



Instituto Politécnico de Coimbra

Instituto Superior de Engenharia

Conceção, Projeto e Instalação de um Carro para Movimentação de Torres Eólicas no Processo Produtivo

Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

Autor

Gilberto Pinto de Almeida

Orientador

Professor Doutor Luis Manuel Ferreira Roseiro

Professor Adjunto

Coimbra, novembro, 2013

“O impossível não é um fato: é uma opinião.”

Mário Sérgio Cortella

Dedicatória

*Aos meus pais e irmã pelo amor e apoio incondicional, aos meus tios José Quina
Diogo e Maria Cristina Catalani Quina Diogo pela forma afável como me
acolheram no seu lar, pelo carinho e atenção com que me presentearam.
Aos quais devo a realização deste estágio enriquecedor.*

*A vocês que estão sempre no meu coração,
um sincero obrigado.*

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado a todas as pessoas ou instituições que deram a sua contribuição para que este trabalho fosse realizado. A todos eles deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Em primeiro lugar agradeço a Engebasa por me ter proporcionado a realização deste estágio e a todos os seus colaboradores pela forma como me receberam e me transmitiram os seus conhecimentos.

Em segundo lugar agradeço ao Professor Doutor Luis Roseiro a forma como orientou o meu trabalho. As notas dominantes da sua orientação foram a utilidade das suas recomendações e a cordialidade com que sempre me recebeu. Estou grato por ambas e também pela liberdade de ação que me permitiu, que foi decisiva para que este trabalho contribuísse para o meu desenvolvimento pessoal.

Gostaria ainda de agradecer ao meu co orientador Engenheiro Carlos Augusto Martins, pela forma com que me auxiliou durante todo o estágio, pela disponibilidade que sempre demonstrou, e também ao Engenheiro Cezar Luquet por toda a atenção, e pela forma como me ofertou a sua experiencia profissional.

Deixo também uma palavra de agradecimento aos meus primos, Alexandre, Gustavo, Guilherme e Moisés pelo companheirismo, amizade, pelos diversos momentos de descontração que passamos juntos.

Finalmente, gostaria de deixar um agradecimento a todos os meus amigos que apesar da distância sempre estiveram comigo, com palavras de apoio e de incentivo, em especial, a Liliana, ao Fábio, ao Cesar, ao Marlon, ao António e ao Paulo.

RESUMO

O relatório que se apresenta neste trabalho insere-se no âmbito do Projeto/Estágio integrante do Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Área de Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Este estágio decorreu na empresa Engebasa, em Cubatão – São Paulo, Brasil.

O estágio envolveu a participação no desenvolvimento e implementação de vários sistemas mecânicos para a melhoria do processo produtivo de torres eólicas, com particular destaque para um carro de movimentação de troços de torres, cujo desenvolvimento, cálculo estrutural e processo de fabrico se descreve neste trabalho. O carro de movimentação desenvolvido, com características inovadoras, enquadrou-se na necessidade de um sistema que permitisse a deslocação automatizada dos troços de torres eólicas entre os vários setores produtivos, permitindo desta forma uma otimização dos tempos de fabricação, o aumento da capacidade de produção e a consequente redução do custo final de cada torre.

O protótipo do projeto desenvolvido encontra-se em funcionamento na Engebasa, estando atualmente em construção mais quatro unidades para instalar num novo setor industrial da empresa Engebasa, situada em Porto Alegre - Brasil estando em produção.

Palavras-chave: *Projeto de Equipamentos Mecânicos, Aerogerador, Torre Eólica.*

ABSTRACT

The report presented in this work is within the scope of the Project/Internship, which is the last step to obtain the Master Degree in Mechanical Equipment and Systems - Specialization in Construction and Maintenance of Mechanical Equipment, from Coimbra Institute of Engineering. This internship took place at the company Engebasa, in Cubatão - São Paulo, Brazil.

The internship involved the participation in the development and implementation of some mechanical systems to improve the production process of wind towers, with a particular emphasis on a handling car for tower sections. The development, structural design and manufacturing process of the handling car is described in this report.

With the inclusion of some innovative features, the handling car was part of the need for a system to allow the automatic displacement and rotation of the wind tower sections, among the various productive sectors, thereby enabling the optimization of manufacturing times, increased production capacity and the consequent reduction of the final cost of each tower.

The developed prototype of the handling car is now operating in Engebasa, and there are currently four more units under construction for installment in a new Engebasa Unit Company located in Porto Alegre - Brazil.

Keywords: *Project Mechanical Equipment, Wind Turbine, Wind Tower.*

ÍNDICE

Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xiv
Simbologia e Siglas.....	xv

CAPÍTULO 1

1. Introdução.....	1
--------------------	---

CAPÍTULO 2

2. Apresentação da empresa.....	3
---------------------------------	---

CAPÍTULO 3 – ENQUADRAMENTO DA ENERGIA EÓLICA E AEROGEADORES

3.1. Energia eólica.....	5
3.2. Aerogeradores.....	7
3.2.1. Aerogerador de eixo vertical.....	7
3.2.2. Aerogerador de eixo horizontal.....	9

CAPÍTULO 4

4. Processo produtivo de uma torre eólica.....	13
--	----

CAPÍTULO 5 – PROJETO DE CARRO DE MOVIMENTAÇÃO

5.1. Carros de movimentação já existentes.....	29
5.2. Carro de movimentação projetado.....	31
5.2.1. Escolha dos materiais.....	32
5.2.2. Dimensionamento e cálculo estrutural.....	35
5.2.2.1. Estrutura de suporte.....	35
5.2.2.2. Veio de transmissão.....	40
5.2.2.3. Roda de decapagem.....	45
5.2.2.4. Roda de pintura.....	49

5.2.3. Estimativa de custos.....	53
5.2.4. Planeamento da execução do carro.....	56
5.2.5. Fabricação.....	59
5.2.6. Testes finais.....	71
5.3. Simulação de trabalho.....	72
5.4. Identificação de melhorias.....	74

CAPÍTULO 6 – OUTRAS MELHORIAS IMPLEMENTADAS

6.1. Dispositivo mecânico para o apoio na instalação da armação da porta de vigia.....	77
6.2. Gabarito de apoio.....	78
6.3. Estrutura de apoio à ligação do batente.....	79
6.4. Virador para montagem de internos.....	80
6.5. Carro de transferência.....	81

CAPÍTULO 7

7. Conclusão.....	83
Bibliografia.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Vista aérea da empresa Engebasa.....	3
Figura 2 - Visualização esquemática dos tipos de aerogeradores.	7
Figura 3 - Representação esquemática dos tipos de aerogeradores de eixo vertical.	8
Figura 4 - Representação esquemática de um aerogerador de eixo vertical.....	8
Figura 5 - Tipos de aerogeradores de eixo horizontal: a) <i>Upwind</i> e b) <i>Downwind</i>	9
Figura 6 - Princípio de funcionamento de um aerogerador de eixo horizontal.	10
Figura 7 - Componentes principais de um aerogerador da marca Nordex.	10
Figura 8 - Torre de 78 metros constituída por 3 troços.	13
Figura 9 - Vista geral do armazém da empresa com chapa para produção das torres eólicas.....	14
Figura 10 - Vista geral da secção de oxicorte: a) Mesa de oxicorte; b) Posicionamento da chapa.	14
Figura 11 - Perspetiva do processo de chanfragem da chapa.....	15
Figura 12 - Visualização da secção de chanfragem: a) Antes da limpeza; b) Após a limpeza.	15
Figura 13 - Chapa a ser calandrada.	16
Figura 14 - Operador a depositar o cordão de soldadura interior.....	16
Figura 15 - Soldadura longitudinal a) Exterior; b) Interior.	17
Figura 16 - Área de armação de virolas: a) Equipamento para armação de virolas;.....	18
Figura 17 - a) Batente; b) Corte da virola; c) Batente aplicado.....	18
Figura 18 - “Cristo” de soldadura por arco-submerso.....	19
Figura 19 - Virador de rotação dos troços.	19
Figura 20 - Limpeza das juntas interiores.	20
Figura 21 - Procedimento de soldadura interior: a) Braço de soldadura alinhado; b) Troço a ser soldado pelo seu interior.....	20
Figura 22 - Inspeção por ultra-sons a um troço.....	21
Figura 23 - Detalhe de uma flange.	21
Figura 24 - Imagem do <i>layout</i> do software <i>Easy Link</i> para controlo posicional das flange.....	22

Figura 25 - a) <i>Easy-laser</i> ; b) Medição de uma flange através do <i>easy-laser</i>	22
Figura 26 - Ajuste posicional de uma flange por maquinagem.	23
Figura 27 - Soldadura dos pernos de troço.	24
Figura 28 - Perspetiva da cabine de decapagem.	25
Figura 29 - Zona de soldadura de um troço: a) Antes do processo de decapagem;	25
Figura 30 - Troço: a) Antes do acessório aplicado; b) Depois do acessório aplicado.	26
Figura 31 - Troço pintado.	26
Figura 32 - Área de montagem de internos: a) Perspetiva da zona de montagem; b) Troço com os internos já montados.	27
Figura 33 - Expedição de um troço.	27
Figura 34 - Carros de movimentação existentes: a) Carro de decapagem; b) Carro de pintura.	30
Figura 35 - Movimentação do troço.	30
Figura 36 - Visualização 3D do carro de movimentação projetado.	31
Figura 37 - Bloco de roda da marca DEMAG.	32
Figura 38 - Subconjunto de acionamento do carro de movimentação.	32
Figura 39 - a) Motor de rotação de troços; b) Redutor para ajuste da velocidade de rotação.	34
Figura 40 - Geometria 3D da chumaceira FCM, acoplamento ANTARES e anel IMETEX.	34
Figura 41 - Representação esquemática do elemento SOLID da biblioteca do Solidworks Simulation.	35
Figura 42 - Geometria 3D de algumas estruturas de suporte desenvolvidas.	36
Figura 43 - Estrutura de suporte final.	36
Figura 44 - Geometria e dimensões da estrutura de suporte [mm].	37
Figura 45 - Modelo de elementos finitos da estrutura de suporte.	38
Figura 46 - Malha de elementos finitos da estrutura de suporte.	38
Figura 47 - Distribuição global das tensões de von Mises.	39
Figura 48 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 100 MPa.	39
Figura 49 - Distribuição global dos deslocamentos equivalentes.	39

Figura 50 - Distribuição de isovalores dos deslocamentos equivalentes - 0.3 mm.	40
Figura 51 - Visualização 3D da integração do veio no conjunto motor.	40
Figura 52 - Geometria e dimensões do veio [mm].	41
Figura 53 - Diagramas de esforços transversos e momentos fletores: a) Caso 1; b) Caso 2.	41
Figura 54 - Modelo de elementos finitos do veio de transmissão.	43
Figura 55 - Malha de elementos finitos do veio de transmissão.	43
Figura 56 - Distribuição das tensões de von Mises.	44
Figura 57 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 187 MPa.	44
Figura 58 - Distribuição dos deslocamentos equivalentes.	44
Figura 59 - Distribuição de isovalores dos deslocamentos equivalentes - 0.9 mm.	45
Figura 60 - Roda de decapagem aplicada no veio.	45
Figura 61 - Geometria e dimensões da roda de decapagem [mm].	46
Figura 62 - Modelo de elementos finitos da roda de decapagem.	47
Figura 63 - Malha de elementos finitos da roda de decapagem.	47
Figura 64 - Distribuição das tensões de von Mises.	48
Figura 65 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 90 MPa.	48
Figura 66 - Distribuição dos deslocamentos equivalentes.	48
Figura 67 - Distribuição de isovalores dos deslocamentos equivalentes - 0.05 mm.	49
Figura 68 - Geometria 3D da roda da pintura acoplada ao veio.	49
Figura 69 - Dimensões da roda da pintura [mm].	50
Figura 70 - Modelo de elementos finitos da roda da pintura.	51
Figura 71 - Malha de elementos finitos da roda de pintura.	51
Figura 72 - Distribuição das tensões de von Mises.	52
Figura 73 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 90 MPa.	52
Figura 74 - Distribuição dos deslocamentos equivalentes.	53
Figura 75 - Isovalores da distribuição dos deslocamentos equivalentes - 0.015 mm.	53
Figura 76 - Detalhamento da roda de decapagem.	56

Figura 77 - Plano de operação da roda de decapagem.	57
Figura 78 - Relatório de provisionamento de material para o carro.	58
Figura 79 - Relatório de inspeção.	58
Figura 80 - a) Corte da chapa na mesa de oxi-corte; b) Peças cortadas e limpas.	59
Figura 81 - a) Chanfre a ser efetuado nas peças; b) Peças já dobradas.	59
Figura 82 - Vigas ponteadas preparadas para enchimento de solda.	60
Figura 83 - Estrutura com os cordões de soldadura depositados.	60
Figura 84 - Estrutura em fase de inspeção por líquidos penetrantes.	61
Figura 85 - Estruturas após o tratamento superficial.	62
Figura 86 - Estruturas de suporte em procedimento de alívio de tensões por vibração.	63
Figura 87 - Estrutura em fase de maquinagem.	64
Figura 88 - a) Blocos de rodas a serem aplicados na estrutura; b) Conjunto pintado.	65
Figura 89 - a) Veio a ser maquinado; b) Veios após maquinação.	66
Figura 90 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultra-som.	67
Figura 91 - Maquinagem da roda de decapagem: a) Diâmetro externo; b) Ranhuras.	68
Figura 92 - Roda de pintura: a) Em maquinação; b) Após maquinação.	68
Figura 93 - a) Redutor aplicado na estrutura; b) Rodas montadas nos veios.	69
Figura 94 - a) Carro livre finalizado; b) Carro motriz finalizado.	69
Figura 95 - a) Carro motriz com a parte elétrica instalada; b) Painel de controlo.	70
Figura 96 - Visualização do painel de comando.	70
Figura 97 - a) Troço de 60 toneladas sobre os carros; b) Teste ao sistema de movimentação.	71
Figura 98 - Teste ao sistema de rotação.	71
Figura 99 - Perspetiva da área de trabalho dos carros de movimentação.	72
Figura 100 - Troço dentro da cabine de decapagem.	73
Figura 101 - Troço dentro da cabine de pintura.	73
Figura 102 - Identificação dos pontos de melhoria no carro de movimentação.	74
Figura 103 - a) Armação da porta; b) Dispositivo desenvolvido; c) Simulação de trabalho.	77

Figura 104 - a) Dispositivo fixo na armação; b) Armação a ser aplicada; c) Detalhe do dispositivo.	78
Figura 105 - a) Batente; b) Corte da virola; c) Batente aplicado.....	78
Figura 106 - a) Gabarito desenvolvido; b) Gabarito fabricado.	79
Figura 107 - Dispositivo para solda do batente.....	79
Figura 108 - Dispositivo fabricado.....	80
Figura 109 - Viradores existentes na empresa.....	80
Figura 110- a) Virador motriz; b) Detalhe da roda embutida na estrutura; c) Virador livre.....	81
Figura 111 - Carro de transferência projetado.....	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências de projeto para dimensionamento dos blocos de rodas e do motor.	33
Tabela 2 - Características mecânicas do aço ASTM A36 fornecidas pelo fabricante.....	37
Tabela 3 - Características mecânicas do aço SAE 4140 fornecidas pelo fabricante.	41
Tabela 4 - Características mecânicas do aço ASE 1020 fornecidas pelo fabricante.	46
Tabela 5 - Características mecânicas do aço SAE 4140 fornecidas pelo fabricante.	50
Tabela 6 - Caderno de encargos resumido do carro motriz.....	54
Tabela 7 - Caderno de encargos resumido do carro livre.....	55
Tabela 8 - Custo total do conjunto	56

SIMBOLOGIA E SIGLAS

SIMBOLOGIA

d - Diâmetro do veio.

E - Módulo de elasticidade longitudinal.

HB - Dureza Brinell.

K_f - Coeficiente de choque e fadiga aplicado ao momento fletor.

K_t - Coeficiente de choque e fadiga aplicado ao momento torsor.

M_f - Momento fletor.

M_t - Momento torsor.

N - Esforço Axial.

n - Velocidade de rotação do motor.

P - Potência.

α - Coeficiente de encurvadura.

ρ - Massa específica.

ε_R - Alongamento relativo.

σ_{ced} - Tensão de cedência do material.

σ_{rut} - Tensão de rotura do material.

τ_{adm} - Tensão de corte admissível.

τ_{máx} - Tensão de corte máxima.

SIGLAS

IT - Instrução de trabalho.

ANAB - Ansi-Asq National Accreditation Board

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ASTM - American Society for Testing Materials

ISO - International Organization for Standardization

RvA - Raad voor Accreditatie

SAE - Society of Automotive Engineers

1. INTRODUÇÃO

O presente estágio insere-se no âmbito do Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos do Instituto de Engenharia de Coimbra e teve como principal objetivo o contacto com o mercado de trabalho em contexto académico. O estágio decorreu na empresa Engebasa, em Cubatão – São Paulo, Brasil, uma empresa metalomecânica que se dedica à construção e reparação de diversos sistemas mecânicos, com particular destaque para a produção de torres eólicas, e que procura afincadamente otimizar a sua linha de produção investindo em tecnologia de ponta para manter o nível de qualidade dos seus produtos.

No recorrer do estágio foram aplicados conhecimentos adquiridos ao longo de todo o percurso académico, permitindo um contacto em contexto real com diversos tipos de equipamentos mecânicos, assim como o desenvolvimento de competências ao nível da resolução de problemas complexos. A participação em diversos projetos a serem implementados na empresa e a atribuição de responsabilidades de acompanhamento de trabalhos e desenvolvimento de soluções ao nível de sistemas mecânicos de apoio à produção foram de extrema importância na aprendizagem realizada e competências adquiridas. Neste contexto destaca-se um desafio lançado pelos responsáveis da empresa no decorrer do estágio, o desenvolvimento de uma solução do tipo “carro” que otimizasse o sistema produtivo dos troços das torres eólicas. Este tipo de solução, que se pretendia implementar numa nova unidade industrial de produção de torres eólicas, em fase de construção em Porto Alegre - Brasil, havia sido pesquisada no mercado, não tendo sido identificada a sua disponibilização. Foi assim assumida a responsabilidade pelo desenvolvimento de um equipamento, designado neste trabalho por “carro de movimentação”, para testes na unidade de produção da Engebasa em Cubatão e posterior introdução na nova unidade industrial de Porto Alegre.

Por razões de gestão de espaço e escrita de relatório, o trabalho que se apresenta é principalmente direcionado para o desenvolvimento do “carro de movimentação”, que obrigou a uma passagem pelas diversas fases de desenvolvimento de um projeto, desde a sua conceção, cálculos, execução e testes. Contudo, os trabalhos desenvolvidos pelo estagiário incluíram outras tarefas de conceção e projeto, que se enumeram de forma resumida.

O plano de trabalhos do estagiário seguiu o seguinte alinhamento:

- Fase 1. Conhecimento da Empresa e do processo de fabrico de torres eólicas;
- Fase 2. Identificação de possibilidades de melhoria ao nível do processo produtivo;
- Fase 3. Desenvolvimento e implementação das melhorias identificadas;
- Fase 4. Elaboração do relatório final de estágio.

O relatório de estágio que se apresenta está dividido em 7 capítulos. Apesar da identificação e participação ativa na implementação de diversos sistemas mecânicos que contribuíram para a melhoria do sistema produtivo das torres eólicas, opta-se por descrever de modo mais detalhado a principal melhoria que foi implementada, o carro de movimentação de troços de torres eólicas. Importa aqui referir que, por razões de confidencialidade exigida pela Engebasa, não se expõem de modo detalhado alguns aspetos do desenvolvimento desta solução, como por exemplo os desenhos técnicos. Assim, no seguimento deste capítulo, onde se enquadra o trabalho efetuado no decorrer do estágio, assim como a opção de escrita deste relatório, procede-se no capítulo dois a uma descrição sucinta da Empresa Engebasa, local onde decorreu o estágio.

Atendendo ao enquadramento dos trabalhos desenvolvidos, nomeadamente por envolver o processo de produção de torres eólicas, foi entendimento do estagiário descrever uma breve introdução sobre energia eólica e ainda dar a conhecer os principais componentes estruturais de um aerogerador, assim como os vários tipos de aerogeradores mais utilizados nos dias de hoje. Esta descrição é feita no capítulo três.

No capítulo quatro descreve-se com maior pormenor o processo de fabrico de uma torre eólica, elemento estrutural principal de um aerogerador de eixo horizontal, que é habitualmente produzido na Engebasa.

O capítulo cinco descreve de modo pormenorizado todos os passos desde a fase de conceção até à implementação da solução desenvolvida para transporte automatizado dos troços de torres eólicas durante o processo produtivo. No capítulo seis descrevem-se de modo sucinto outras soluções de melhoria, cuja necessidade havia sido identificada, e de que forma implementadas no decorrer do estágio.

No capítulo sete apresentam-se as conclusões retiradas de todo o trabalho desenvolvido e implementado no decorrer deste estágio.

2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

O trabalho de estágio aqui apresentado foi desenvolvido na empresa Engebasa (figura 1), situada em Cubatão - São Paulo, Brasil. Fundada em 1971, a Engebasa dedicou-se ao apoio do setor produtivo industrial com serviços especializados de produção, fornecimento, manutenção e reparação de equipamentos, em particular para a indústria mineira, metalúrgica, siderúrgica, química e de fornecimento de fertilizantes.



Figura 1 - Vista aérea da empresa Engebasa.

Em 2007, como resposta à procura de mercado, a Engebasa reestruturou-se, construindo um *layout* industrial para fabricação de Torres Eólicas no Brasil. Foi a primeira empresa Brasileira a proceder a este tipo de reestruturação, tendo contratado mão-de-obra especializada, assim como procedido à aquisição de máquinas e equipamentos de última geração para o setor produtivo. Em 2009, foi a primeira empresa, no Brasil, no segmento de fabricação de torres eólicas a ser certificado pela norma ISO 9001:2008. É atualmente detentora de dois selos internacionais: ANAB (permissão para fornecer o mercado americano) e RvA (permissão para fornecer o mercado europeu).

A Engebasa conta atualmente com 260 colaboradores, destacando-se entre eles 1 administrador de empresas, 19 engenheiros de diversas áreas, 8 técnicos mecânicos, 6 técnicos de ultrassons, 4 técnicos de líquido penetrante, 8 técnicos soldadores, 4 técnicos de maquinagem convencional, 1 médico de trabalho e 1 enfermeiro de trabalho.

Os principais clientes da empresa no setor eólico são a Alston, a Gamesa, a Impsa, a Suzlon e a Wobben – Enercon.

Situada a cerca de 30 km da baía de Santos, numa zona fortemente poluída, a Engebasa estimula e aplica políticas de proteção do meio ambiente, promovendo a consciencialização ambiental, de modo a garantir o equilíbrio com o meio ambiente envolvente. Ao nível dos recursos humanos identifica-se também uma clara preocupação, pela segurança, pretendendo garantir e preservar a integridade física dos seus colaboradores, assim como das instalações, equipamentos e ferramentas de trabalho, de modo a melhorar a qualidade de vida e a continuidade operacional.

A empresa promove várias ações de formação, tanto de carácter técnico como do tipo preventivo que visam minimizar os riscos de saúde dos seus colaboradores, proporcionando uma melhor qualidade de vida e um ambiente mais seguro e saudável, tal como a constante melhoria da qualidade dos seus serviços.

3. BREVE ENQUADRAMENTO DA ENERGIA EÓLICA E AEROGERADORES

Atendendo a que a maior parte do trabalho que foi desenvolvido na Engebasa se enquadrou ao nível dos componentes estruturais de aerogeradores, em particular as torres eólicas, neste capítulo apresenta-se o seu princípio de funcionamento, e identificam-se e descrevem-se os seus elementos estruturais principais.

3.1. Energia Eólica

O atual contexto energético, caracterizado pela escassez e elevado custo das fontes de energia tradicionais, tem reforçado o papel da importância das energias renováveis ao nível mundial. As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda a energia disponível na Terra e, por isso, são praticamente inesgotáveis, não alterando o balanço térmico do planeta. As fontes de energia renovável podem e devem ser utilizadas de forma sustentável, de modo a que resulte no mínimo de impacto no meio ambiente. De entre as principais fontes de energia renovável podem-se enumerar: energia hidráulica; biomassa; energia solar; energia geotérmica; energia maremotriz; energia do hidrogénio e a energia eólica. O aproveitamento destas fontes de energia está a conquistar o espaço que antes era ocupado totalmente pelas fontes fósseis, o que tem sido propiciado pelo desenvolvimento tecnológico que permite o aproveitamento dessas fontes renováveis como combustíveis alternativos.

A energia eólica é atualmente a que possui maior grau de desenvolvimento e implementação. Como a maior parte das fontes de energia renovável (exceto a energia geotérmica), a energia eólica é uma forma de energia solar dado que tem origem no aquecimento da atmosfera pelo sol, que põe em movimento as massas de ar. A rotação da terra, a forma e cobertura da superfície terrestre e os planos de água, influenciam o regime do vento, ou seja, a velocidade, direção e variabilidade do vento num determinado lugar. Em rigor, a energia que é oferecida pelo vento é utilizada desde há milhares de anos para responder a diversas necessidades da atividade humana. Veja-se a forma como os barcos eram usados (barco à vela), ou como se preparava a farinha a partir de grãos de cereais (moinhos à vela) ou ainda com se bombeava água para as levadas nas zonas mais ventosas.

A energia eólica representa o aproveitamento da energia cinética contida no vento para produzir energia mecânica que pode a seguir ser utilizada de diversas formas. Ora, uma das possibilidades de utilização passa por fazer rodar um gerador elétrico, transformando assim a energia mecânica em energia elétrica. Hoje em dia, a energia eólica é cada vez mais utilizada para produzir eletricidade, seja para utilização local descentralizada, por exemplo em lugares isolados, seja em grandes “parques eólicos” constituídos por vários aerogeradores ligados à rede elétrica (Pacheco, 2006).

De entre as principais vantagens na utilização da energia eólica podem-se enumerar as seguintes:

- Produção de eletricidade a um custo conhecido, que não depende das flutuações no preço dos hidrocarbonetos;
- Tecnologia sem emissão de gases poluentes e sem resíduos;
- Possibilidade de coabitação entre os parques eólicos e outras actividades, como por exemplo a agricultura ou a pastorícia;
- Fonte económica de energia, que pode competir em termos de rentabilidade com as fontes de energia tradicionais e que não requer uma manutenção frequente. Normalmente a revisão dos sistemas mecânicos associados à produção desta energia é feita semestralmente.

Tal como qualquer fonte de energia, também existem desvantagens, enumeram-se as principais:

- A necessidade de um fenómeno da natureza para funcionar (o vento), que pode provocar flutuações na disponibilidade da sua utilização e consequente colocação na rede elétrica;
- Impacto visual pela sua incorporação nas paisagens;
- Impacto sonoro, com emissão de um ruído constante de aproximadamente 43 decibéis, que torna necessário que as habitações mais próximas estejam no mínimo a 200 metros de distância, e que pode também afetar o comportamento habitual de migração das aves.

3.2. Aerogeradores

O aerogerador é um equipamento que tem a capacidade de captar a energia cinética contida no vento e a transformar em energia elétrica. Existem principalmente duas topologias gerais de construção de aerogeradores, os de eixo vertical e os de eixo horizontal, tal com se pode visualizar esquematicamente na figura 2.

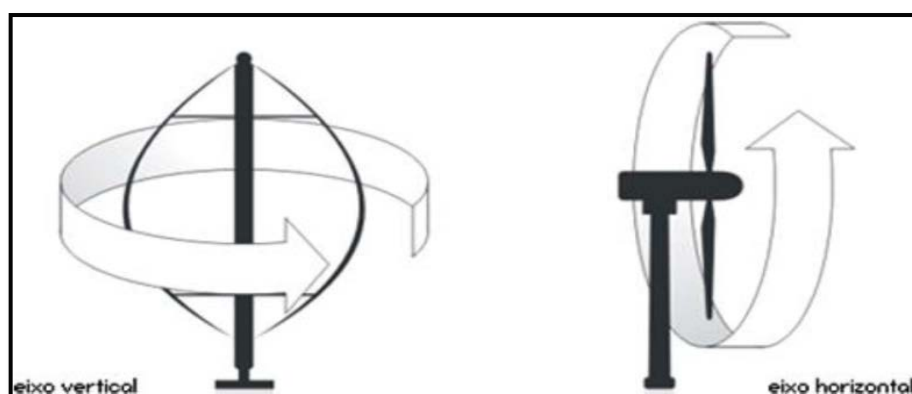


Figura 2 - Visualização esquemática dos tipos de aerogeradores.

(Fonte: http://www.quimarenergy.eu/index02_8.html)

3.2.1. Aerogerador de Eixo Vertical

Num aerogerador deste tipo, o eixo é montado na vertical, perpendicular ao solo. Como os aerogeradores de eixo vertical estão permanentemente alinhadas com o vento (ao contrário dos aerogeradores de eixo horizontal), não é necessário nenhum ajuste quando a direção do vento muda. No entanto, estes aerogeradores necessitam de um impulso ao sistema elétrico para se começarem a movimentar. Todos os equipamentos do aerogerador de eixo vertical se encontram ao nível do solo de modo a facilitar a instalação e serviços, sendo uma vantagem em relação aos aerogeradores de eixo horizontal.

Contudo, isso implica uma área de base maior para a turbina, sendo por isso uma grande desvantagem, por exemplo em áreas de cultivo. Além disso, menor altura significa menor velocidade do vento devido à interferência do solo, e por isso menor aproveitamento da fonte de energia. Regra geral, os aerogeradores de eixo vertical são menos eficientes que os aerogeradores de eixo horizontal. A figura 3 ilustra esquematicamente os três principais tipos de aerogeradores de eixo vertical, nomeadamente: Savonius, Darrieus e Giromill. (Dutra, 2001; Gasch & Twele, 2002).

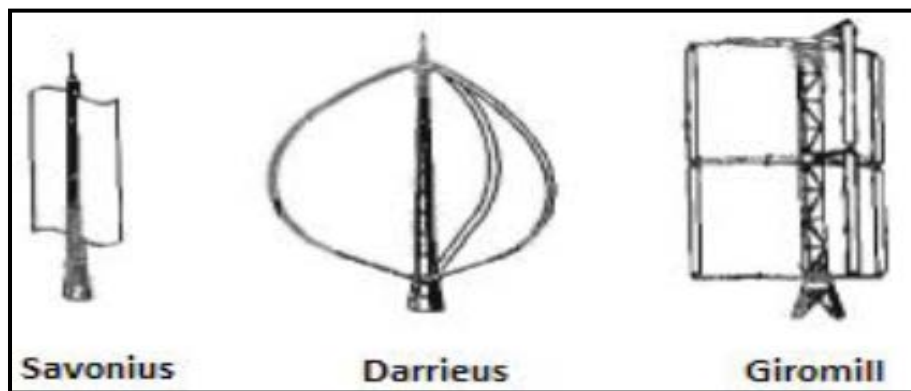


Figura 3 - Representação esquemática dos tipos de aerogeradores de eixo vertical.

(Fonte: http://www.quimarenergy.eu/index02_8.html)

Este tipo de aerogerador pode, por exemplo, ser utilizado para aerogeradores de pequena escala e para o bombeamento de água em áreas rurais. No entanto, são aerogeradores pouco utilizados, sendo produzidos apenas aerogeradores Darrieus, que se assemelha a uma bateadeira de ovos. A figura 4 representa os principais elementos de um aerogerador de eixo vertical.

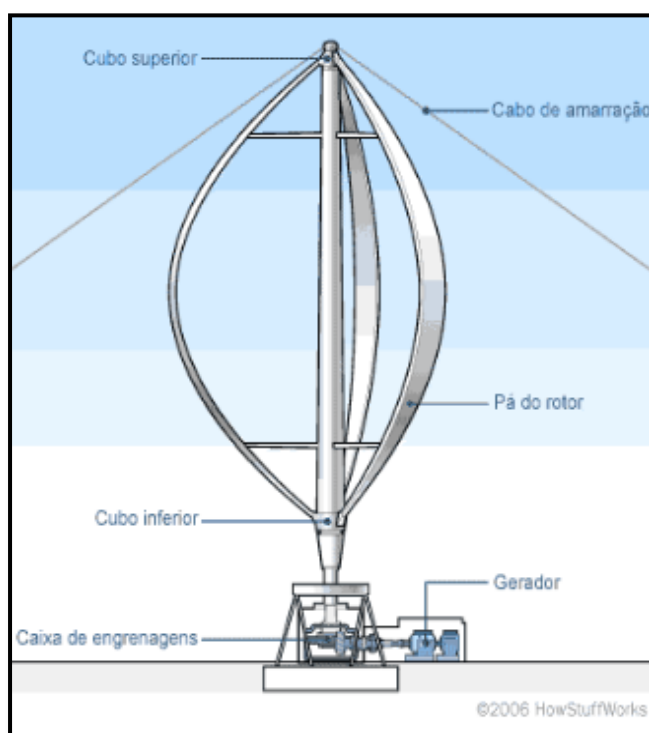


Figura 4 - Representação esquemática de um aerogerador de eixo vertical.

(Fonte: <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>)

3.2.2. Aerogerador de Eixo Horizontal

Um aerogerador de eixo horizontal contém o eixo montado na horizontal e paralelamente ao solo. Os aerogeradores de eixo horizontal, mais conhecidos e mais utilizados, consistem numa estrutura sólida elevada, do tipo torre, normalmente com três pás aerodinâmicas (também podem conter apenas duas), que podem ser orientadas de acordo com a direção do vento. A disposição geométrica destes aerogeradores implicam a necessidade de um mecanismo que permita o posicionamento do eixo do rotor em relação à direção do vento, para garantir um melhor aproveitamento global, principalmente onde se tenha muita mudança na direção do vento. Note-se que é possível ainda hoje encontrar moinhos de vento seculares com direcionamento do eixo das pás relativamente ao vento. Existem duas categorias de aerogeradores de eixo horizontal: o *upwind* em que vento sopra pela parte frontal das suas pás, e o rotor é orientado segundo a direção do vento através de um dispositivo motor; o *downwind* em que o vento sopra pela retaguarda das pás e o seu rotor é flexível e auto orientável (Dutra, 2001; Gasch & Tvele, 2002). A figura 5 ilustra os dois tipos de aerogerador de eixo horizontal.

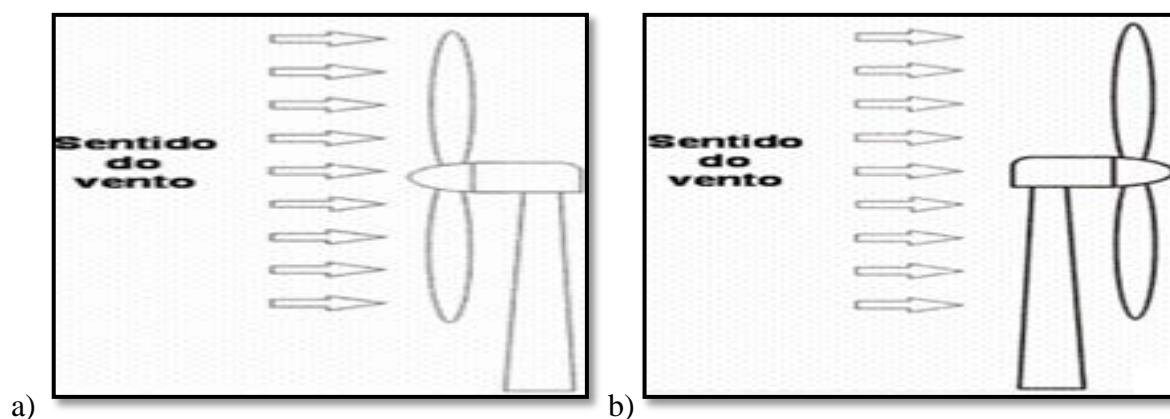


Figura 5 - Tipos de aerogeradores de eixo horizontal: a) *Upwind* e b) *Downwind*.

(Fonte: <http://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com>)

O princípio de funcionamento de um aerogerador de eixo horizontal compreende dois processos de conversão, que recorre a dois componentes do sistema: o rotor, que permite a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica e o gerador que converte a

energia mecânica em energia elétrica. A jusante do gerador, a energia é enviada para a rede elétrica. Este princípio de funcionamento é ilustrado na figura 6.

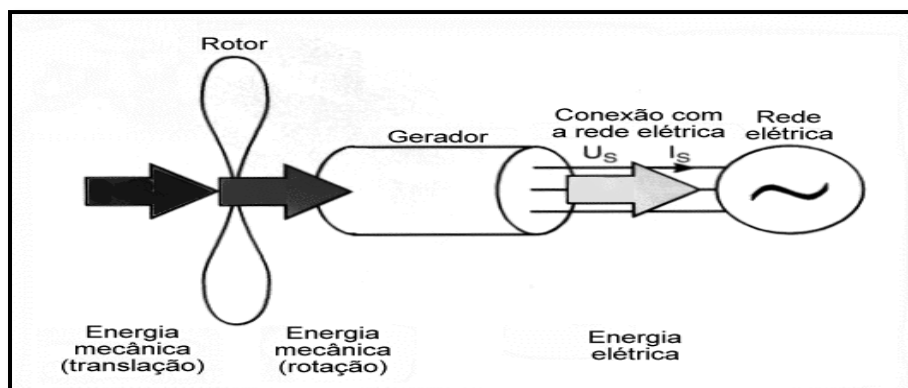


Figura 6 - Princípio de funcionamento de um aerogerador de eixo horizontal.

(Fonte: <http://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com>)

Apesar da simplicidade do princípio de funcionamento de um aerogerador, este equipamento é um sistema complexo no qual convergem e estão intimamente interligadas diversas áreas de conhecimento, tais como aerodinâmica, mecânica estrutural, elétrica e eletrônica ou controle. A figura 7 ilustra os principais componentes de um aerogerador típico.

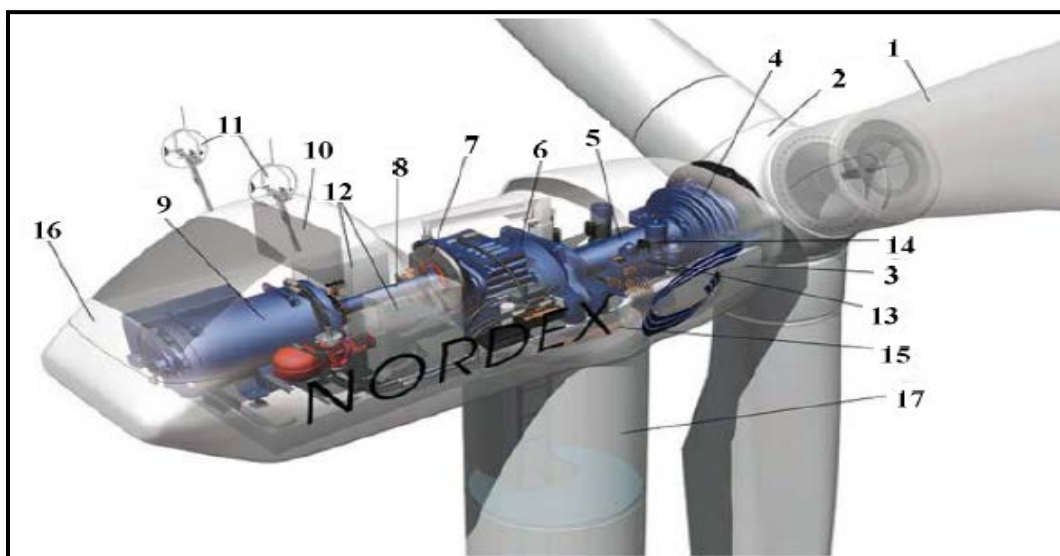


Figura 7 - Componentes principais de um aerogerador da marca Nordex.

(Fonte: <http://www.nordex-online.com>)

De acordo com a figura 7, os componentes principais de um aerogerador de eixo horizontal e as respetivas funções podem ser enumeradas do seguinte modo:

- **Pá do rotor (1)** - Capta o vento e transmite a sua potência ao centro do rotor;
- **Rotor (2)** - Executa a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica (de rotação). É no rotor que são fixas as pás do aerogerador. Todo este conjunto se encontra ligado ao veio de rotação das pás para o gerador, normalmente através de uma caixa multiplicadora;
- **Cabine (3)** - Onde está alojada o sistema de controlo, medição e transmissão mecânica, assim como o gerador elétrico e o mecanismo de orientação direccional;
- **Chumaceira do rotor (4)** - Permite o movimento de rotação do rotor;
- **Veio do rotor (5)** – Permite a transmissão do binário gerado pelo rotor para a caixa de velocidades;
- **Caixa de velocidades (6)** - Mecanismo que transmite a energia mecânica do veio do rotor ao veio do gerador;
- **Travão de disco (7)** – Dispositivo de segurança para paragem do rotor. Pode ser acionado por dispositivos mecânicos, elétricos ou hidráulicos;
- **Veio do gerador (8)** - Transmite o movimento de rotação ao gerador;
- **Gerador (9)** - Componente que converte a energia mecânica do veio em energia elétrica;
- **Sistema de arrefecimento (10)** - Responsável pelo arrefecimento dos diversos componentes;
- **Anemómetro e sensor de direção (11)** – O anemómetro mede a intensidade e a velocidade do vento, normalmente, de 10 em 10 minutos. O sensor de direção capta a direção do vento, para garantir a sua perpendicularidade à torre e assim permitir o máximo de rendimento;
- **Sistema de controlo (12)** - Monitoriza o sistema, desliga o aerogerador em caso de mau funcionamento e controla o mecanismo de ajuste para alinhamento do aerogerador com o vento;
- **Sistema de hidráulico (13)** – Integrado no veio do rotor, de baixa rotação, transfere o binário primário para a caixa de velocidades;
- **Sistema de orientação direccional (14)** – Sistema mecânico para orientação da cabina;
- **Chumaceira do sistema de orientação direccional (15)** - Permite a rotação da cabina;

- **Cobertura da cabine (16)** - Abriga os componentes principais do aerogerador protegendo-os contra intempéries como chuva, vento, poeira e radiação solar;
- **Torre eólica (17)** – Em forma tubular, suporta a cabina de modo a elevar o rotor a uma altura que garanta as características adequadas do vento. É o elemento estrutural responsável por grande parte dos custos iniciais de investimento.

4. PROCESSO PRODUTIVO DE UMA TORRE EÓLICA

Neste capítulo descreve-se com maior pormenor o processo de fabrico dos elementos estruturais dos aerogeradores de eixo horizontal que são habitualmente produzidos na Engebasa. Em rigor, a Engebasa dedica-se exclusivamente à produção do elemento estrutural principal de um aerogerador. A sua torre eólica varia de cliente para cliente, podendo ter entre 50 e 120 metros de altura. As torres são normalmente constituídas por 3 a 5 troços, podendo ter uma massa global entre 130 e 200 toneladas, dependendo do seu tamanho. No processo de preparação, cada cliente apresenta à Engebasa o seu caderno de encargos das torres, variando normalmente as especificações de fabrico, o tamanho e o número de troços.

A figura 8 ilustra como exemplo uma torre de 78 metros fabricada para um dos clientes da empresa. Esta torre é formada por 3 troços. O troço 1, com 18.8 metros, é constituído por 7 virolas com diâmetro decrescente de 4 a 3.76 metros, com uma massa global de 57 toneladas, unidos por cordão de soldadura e flangeado nas suas extremidades. O troço 2, com 28.5 metros, é constituído por 11 virolas com diâmetro decrescente de 3.76 a 2.92 metros, apresentando uma massa global de 55 toneladas. O troço 3, com 28.5 metros, é constituído por 10 virolas com diâmetro decrescente de 2.92 a 2.31 metros, com uma massa global de 35 toneladas.

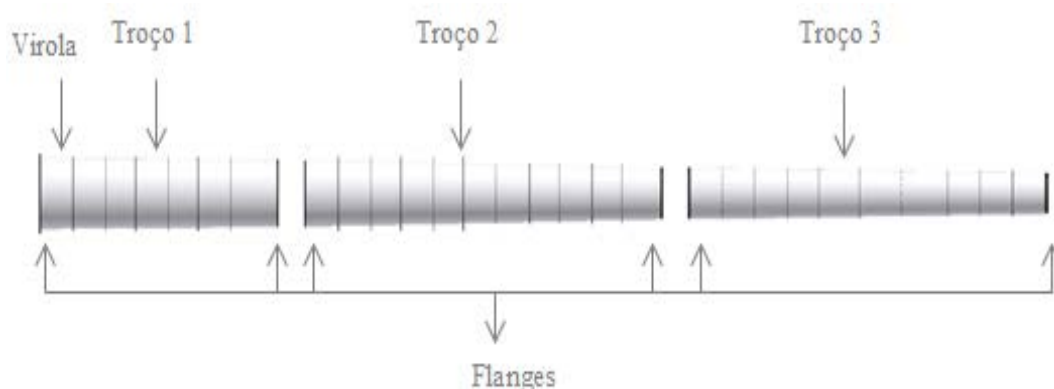


Figura 8 - Torre de 78 metros constituída por 3 troços.

O processo produtivo de uma torre eólica inicia-se com o aprovisionamento dos materiais no armazém da empresa, feito de acordo com o projeto do cliente e o respetivo caderno de encargos. A figura 9 ilustra o armazenamento de chapa no armazém da empresa.



Figura 9 - Vista geral do armazém da empresa com chapa para produção das torres eólicas.

Depois de aprovacionada, recorrendo a uma ponte rolante bi-viga de 10 toneladas, a chapa é transportada para a unidade fabril de acordo com o planeamento diário. Nesta unidade a chapa é inicialmente trabalhada na mesa de oxicorte. A figura 10 mostra a vista geral da mesa de oxicorte e a colocação da chapa na fase final de transporte.



a)



b)

Figura 10 - Vista geral da secção de oxicorte: a) Mesa de oxicorte; b) Posicionamento da chapa.

Depois de cortada tendo em conta a instrução de trabalho (IT) do posto em causa, a chapa é submetida a controlo dimensional de acordo com a mesma IT. Após este procedimento e eventual ajuste, a chapa é transportada para o segundo processo do fluxo produtivo designado por “chanfro e limpeza de chapa”, onde se executa o procedimento de chanfragem de acordo as especificações do projeto do cliente. A figura 11 mostra uma fase

deste procedimento, sendo possível visualizar o carro de chanfragem, também designado por “chanfradeira”. Este carro contém dois discos de corte, um ajustado à parte superior da chapa e outro à parte inferior, que pressionam a chapa e que com o seu movimento de rotação garantem o deslocamento automático do equipamento ao longo da chapa.



Figura 11 - Perspetiva do processo de chanfragem da chapa.

Após a execução do chanfro, a chapa é sujeita a uma limpeza na zona de chanfragem, de modo a remover a escória gerada no processo, assim como os óxidos de ferro provenientes da sua exposição ao meio ambiente (figura 12).

Após a limpeza da chapa esta fica pronta para o processo seguinte, designado por calandragem.

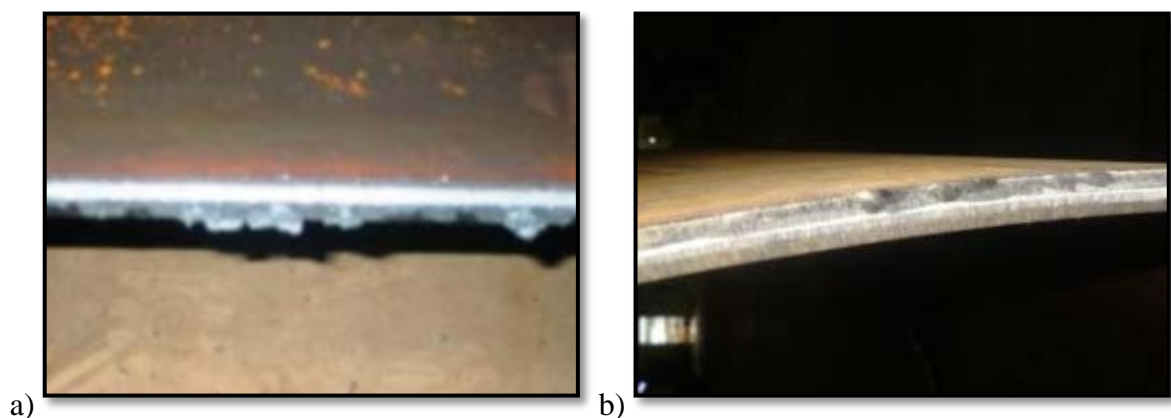


Figura 12 - Visualização da secção de chanfragem: a) Antes da limpeza; b) Após a limpeza.

No processo de calandragem, a chapa é posicionada na mesa da calandra, sendo mecanicamente forçada a deslizar entre um conjunto de rolos e assim obter uma forma circular. A figura 13 ilustra uma chapa em processo de calandragem.



Figura 13 - Chapa a ser calandrada.

Estando a chapa calandrada, procede-se à união das suas extremidades, através de um processo de soldadura do tipo *MIG/MAG* (MIG/MAG Welding, 2003). Que é executado no interior da chapa apenas para garantir a união das extremidades. A figura 14 mostra um operador a depositar o cordão de soldadura interior.



Figura 14 - Operador a depositar o cordão de soldadura interior.

Este elemento estrutural passa agora a ser designado por virola. O cordão longitudinal de soldadura é agora executado no interior e no exterior da virola

O processo de soldadura é executado por arco submerso através da tecnologia *Tandem-Twin* (Licoln Elétric, 2010), isto é, com recurso a uma máquina equipada com 2 cabeças de soldadura, uma AC e outra DC, cada uma com fio de solda de 4mm de diâmetro, podendo atingir taxas de deposição de cerca de 14kg/hora. Na figura 15 pode ser visualizado o processo de soldadura longitudinal exterior e interior.

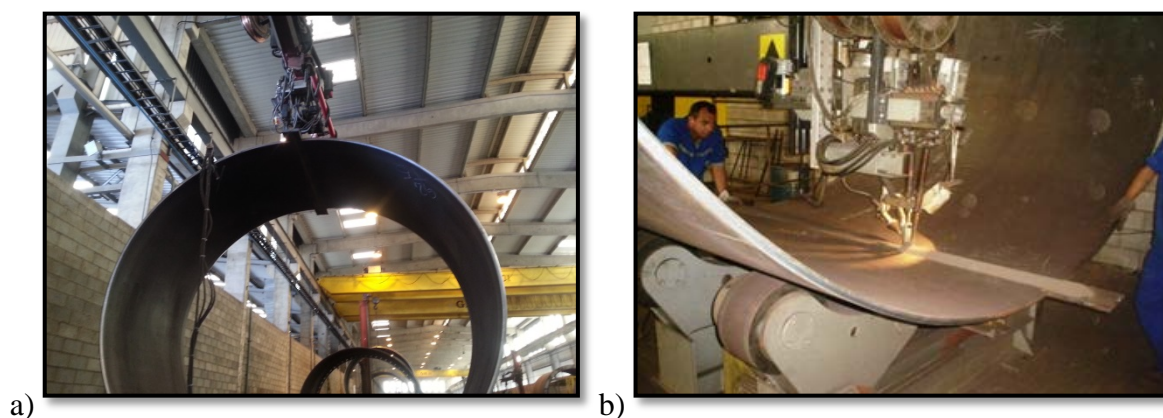


Figura 15 - Soldadura longitudinal a) Exterior; b) Interior.

Terminado o processo de soldadura longitudinal, as virolas estão prontas a serem “armadas”, ou seja, é neste momento do processo que a torre começará a ganhar forma. O processo seguinte é designado por Armação de Virolas, e consiste na utilização de um equipamento que permite o ajuste posicional das virolas.

Este equipamento que foi totalmente desenvolvido pela Engebasa para poder assim otimizar a sua linha de montagem é composto por 4 hidráulicos que fazem o alinhamento dos elementos em todo o seu perímetro. Após a garantia de alinhamento posicional, é depositado um cordão de soldadura pelo interior de modo a “fixar” o alinhamento.

A estrutura resultante da união de várias virolas tem a designação de troço. A figura 16 mostra o equipamento habitualmente usado para a armação das virolas e um troço a ser montado.

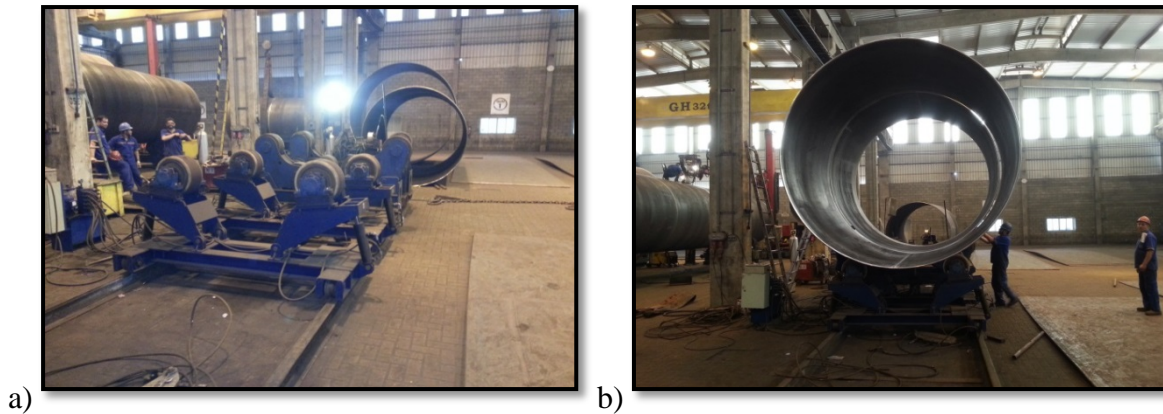


Figura 16 - Área de armação de virolas: a) Equipamento para armação de virolas;
b) Troço a ser montado.

Como procedimento, em primeiro lugar são posicionadas e ligadas as virolas entre si, e por último são colocadas as flanges. O ciclo de posicionamento terminará quando for colocada a segunda flange. As flanges são elementos estruturais de forma circular, produzidos por fundição numa empresa externa entregues preparados para montagem na virola. Este elemento, que garante a união entre troços, é ligado ao troço já com a furação executada para passagem dos parafusos de ligação.

Finalizado o alinhamento das duas primeiras virolas do troço em que será colocado o batente, executa-se a traçagem do seu contorno, seguindo-se o corte da virola e posteriormente a ligação por soldagem do batente às virolas, tal como ilustra a figura 17.

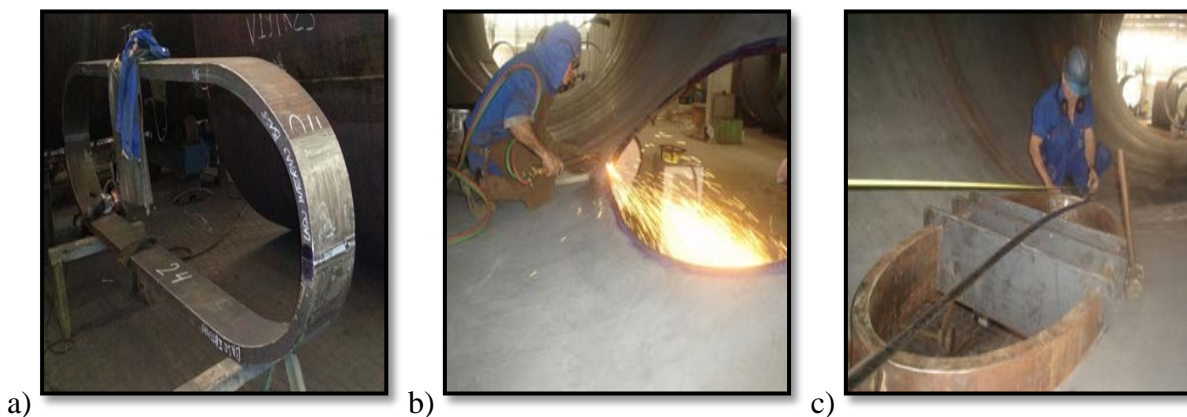


Figura 17 - a) Batente; b) Corte da virola; c) Batente aplicado.

Concluído o procedimento de posicionamento, o troço segue para a soldadura exterior, efetuada através de um equipamento de soldadura por arco submerso acoplado a uma

estrutura de 6m x 6m, designado como “Cristo de Soldadura” (figura 18). Este equipamento é acoplado a um carro que se posiciona em cima de carris de forma a poder depositar o cordão de soldadura ao longo de todo o troço.



Figura 18 - “Cristo” de soldadura por arco-submerso.

Este procedimento é semelhante ao usado na obtenção de soldadura longitudinal, diferindo apenas o sistema de movimentação. Na soldadura longitudinal o elemento encontra-se fixo, movimentando-se apenas o equipamento longitudinalmente ao elemento a soldar, enquanto que no caso do processo de soldadura exterior, o “Cristo de soldadura” está fixo, rodando apenas o troço com o auxílio de um equipamento designado por virador. A figura 19 ilustra um virador de troços.



Figura 19 - Virador de rotação dos troços.

Após a soldadura exterior, é executada a soldadura interior, sendo primeiro removido, por razões de segurança, o cordão de posicionamento que havia sido depositado manualmente para garantir a união entre as juntas armadas e evitar falhas de fusão no processo de soldadura. A figura 20 ilustra o operador a limpar as juntas interiores de posicionamento.

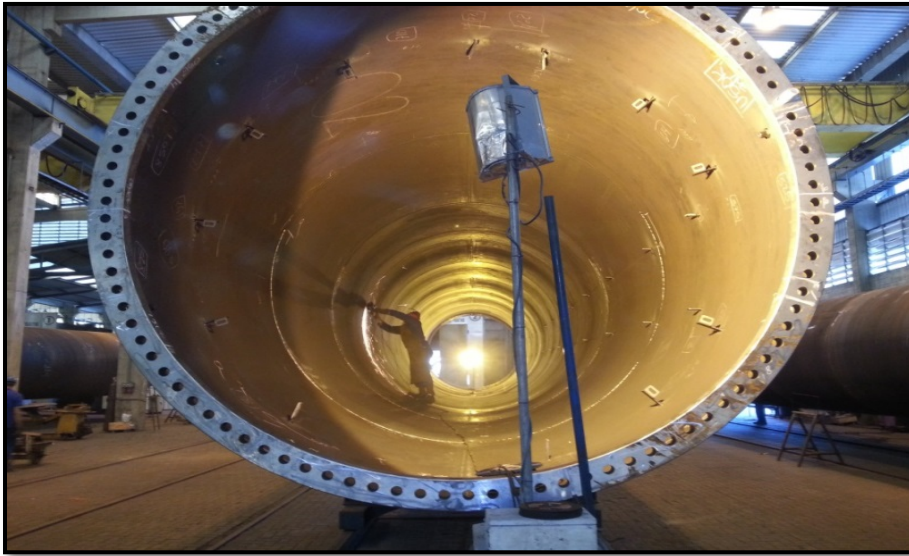


Figura 20 - Limpeza das juntas interiores.

No processo de soldadura interior, o troço é posicionado de modo a que o equipamento de soldadura que se encontra acoplado a um braço metálico de 6 metros esteja coincidente com a junta a soldar. A figura 21 mostra o braço metálico alinhado com a junta a soldar e o troço a ser soldado no seu interior.



a)



b)

Figura 21 - Procedimento de soldadura interior: a) Braço de soldadura alinhado; b) Troço a ser soldado pelo seu interior.

No seguimento do processo de soldadura, e de modo a garantir a qualidade da ligação metálica, os 100% dos cordões de soldadura depositados são submetidos a inspeção por ultra-sons. Caso seja detetado algum defeito de soldadura, o mesmo terá de ser removido até à sua extinção. O troço só avançará para o procedimento seguinte quando não existirem quaisquer defeitos na totalidade dos cordões de soldadura. Na figura 22 pode-se visualizar um operador de ultra-som a inspecionar uma solda circunferencial exterior.



Figura 22 - Inspeção por ultra-sons a um troço.

Terminado o processo de ligação metálica por soldadura, é executado um controlo dimensional ao troço, em particular ao posicionamento das flanges, de modo a garantir os parâmetros de projeto. São verificados os seguintes parâmetros:

- **Tapper ou tilt** - Referente à inclinação da flange (figura 23), mede-se a distância vertical entre uma flange teoricamente plana (referência) e o lado interno (ID) e externo (OD) da flange em análise. A diferença de cada uma dessas medidas em relação ao mesmo ponto na flange de referência é a inclinação (conicidade);

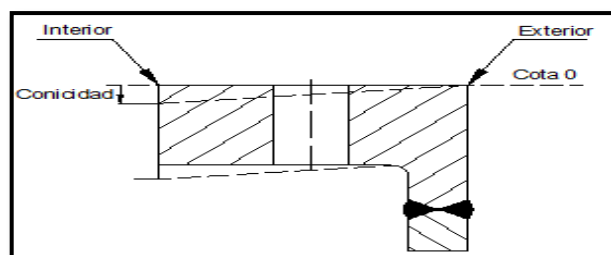


Figura 23 - Detalhe de uma flange.

- **Best-fit** - Depois de se inspecionar a flange com um aparelho designado por *easy-laser* (figura 25), as medidas encontradas podem ser transferidas para o *software easy link* (figura 24) calculando-se o melhor ajuste. O programa define um ponto de referência e calcula o melhor ajuste possível;

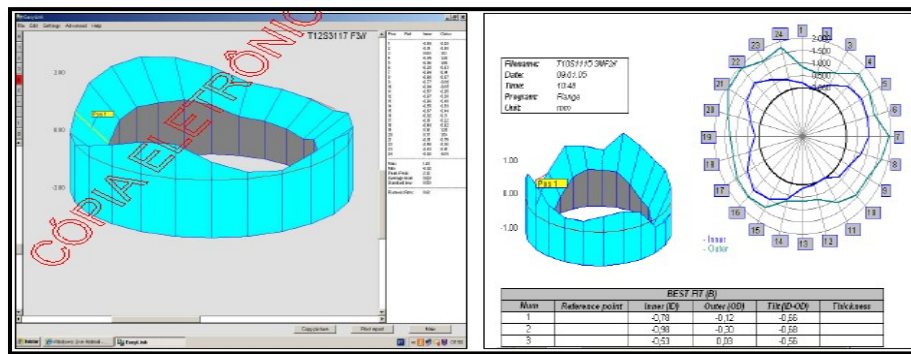


Figura 24 - Imagem do *layout* do software *Easy Link* para controlo posicional das flange.

- **Short-waves** - Refere a ondulação da flange, calculada no software *easy link*,¹ com distâncias curtas pré determinadas;
- **Long-waves** - Refere a ondulação da flange, calculada no software *easy link*, com distâncias longas pré determinadas.

A figura 25 mostra o equipamento *easy-laser*, usado no processo de medição, assim como a execução de um controlo dimensional de uma flange.

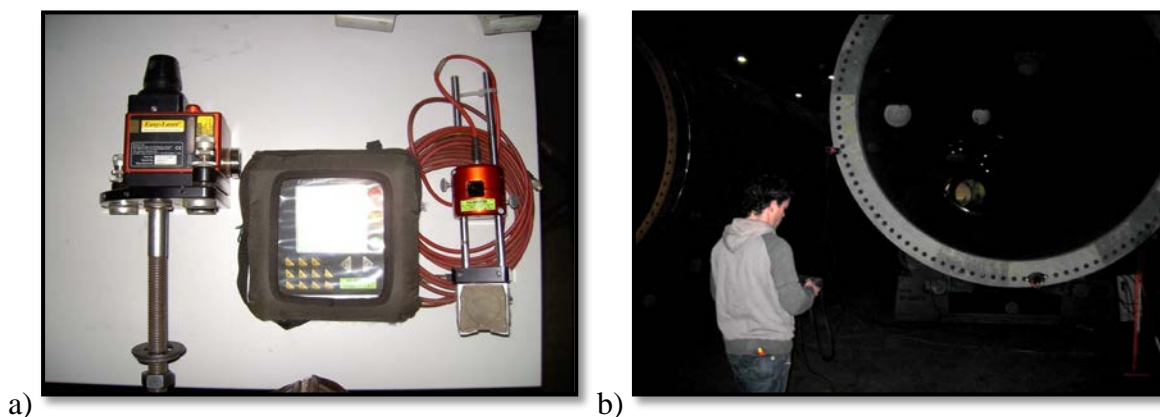


Figura 25 - a) *Easy-laser*; b) Medição de uma flange através do *easy-laser*.

¹ Software de gestão do equipamento *easy-laser*

No seguimento do processo de controlo dimensional, caso os valores estejam fora do intervalo admissível, a flange seguirá para processo de reparação, dependendo da diferença entre os valores obtidos na referida medição e os valores de referência.

Caso a diferença seja pequena, o processo de ajuste dimensional pode ser feito por aquecimento e deformação mecânica na junta virola/flange de modo a que a flange ceda, recuperando para valores dentro do intervalo admissível. Caso essa diferença não seja recuperada pelo processo acima descrito, a flange seguirá para procedimento de maquinagem.

De referir que a maquinagem de flanges não faz parte do fluxo produtivo, tratando-se de uma consequência de uma não conformidade. A figura 26 ilustra uma flange a ser maquinada para ajuste posicional.

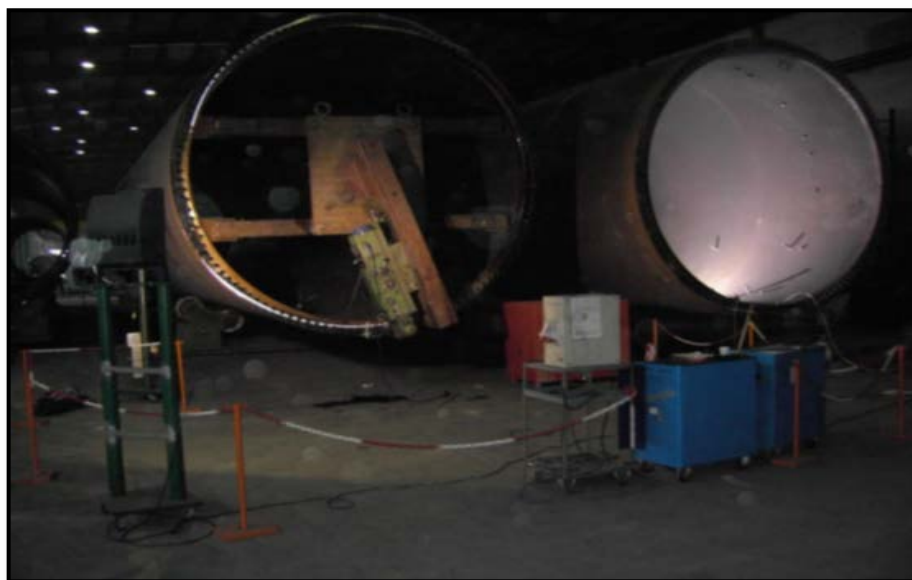


Figura 26 - Ajuste posicional de uma flange por maquinagem.

Após o procedimento de inspeção o troço segue para a montagem dos componentes que permitem a acoplagem de acessórios e equipamentos, necessários ao acesso e movimentação no interior da torre eólica, assim como a seu funcionamento.

Estes elementos estruturais têm a designação de “internos” e integram o aro da porta de acesso, os pernos de fixação das escadas interiores, entre outros.

A figura 27 ilustra o interior de um troço com os pernos soldados.



Figura 27 - Soldadura dos pernos de troço.

Finalizada a colocação dos “internos”, o troço segue para o processo de decapagem, que visa a limpeza da sua superfície metálica, tanto no seu interior como no exterior. Esta limpeza consiste na projeção de pequenas partículas, designadas de granalha de ferro, que são projetadas a uma determinada velocidade contra a superfície do troço.

A velocidade de projeção em conjunto com o tempo de exposição definem o grau de acabamento que se pretende obter, sendo ajustados em função do estado da superfície antes do troço entrar no processo.

Esta limpeza permite a remoção de materiais contaminantes, tais como óxidos de ferro, poeiras, gorduras, sais que impedem a aderência do revestimento e que promovem o processo de corrosão, bem como o aumento da superfície de aderência, através da criação de uma maior rugosidade.

O processo de decapagem é feito no interior de uma cabine (figura 28). A movimentação do troço do exterior para a cabine de decapagem é feita com recurso a dois carros de transporte que se deslocam em dois carris.

A figura 29 ilustra a zona de um cordão de soldadura antes e depois de passar pelo processo de decapagem.



Figura 28 - Perspetiva da cabine de decapagem.

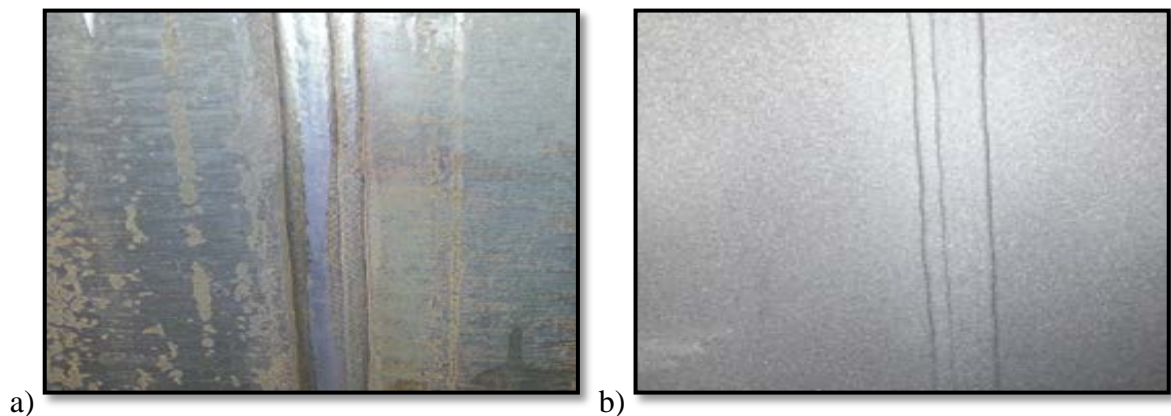


Figura 29 - Zona de soldadura de um troço: a) Antes do processo de decapagem;
b) Após processo de decapagem.

Após a decapagem, a proteção e pintura são o próximo passo do processo de fabrico de uma torre. Antes de entrar na cabine de pintura, são montados 2 acessórios de movimentação em cada uma das flanges do troço, de modo a permitir a sua rotação durante o processo de pintura.

A figura 30 ilustra o troço antes e depois da aplicação do acessório. O troço é transferido para 2 carros que o transportam para o interior da cabine de pintura.

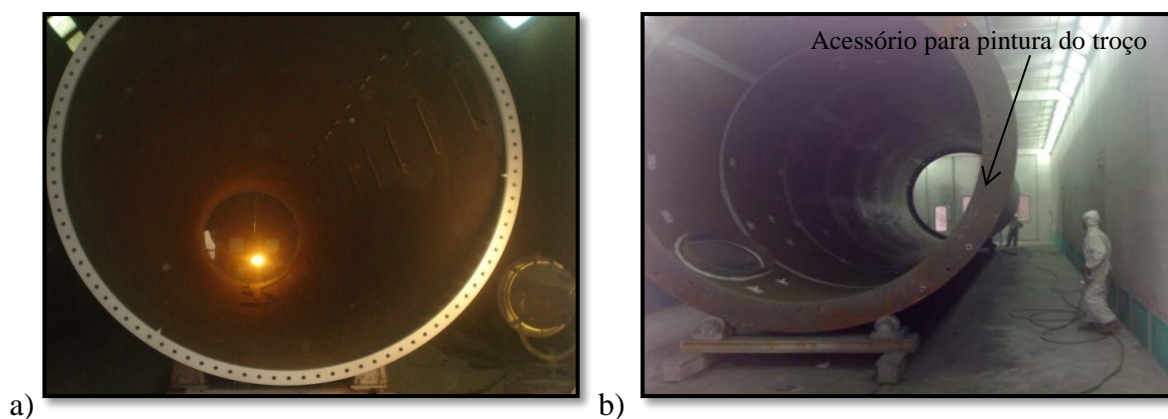


Figura 30 - Troço: a) Antes do acessório aplicado; b) Depois do acessório aplicado.

Depois de aplicados os acessórios no troço, este está pronto para pintar. O processo de proteção e pintura integra 3 fases que consistem na aplicação de primário, de intermédio e acabamento. A figura 31 ilustra o troço já pintado dentro da cabine de pintura.



Figura 31 - Troço pintado.

Após a necessária secagem do processo de pintura, seguindo o troço para a fase de acabamentos finais. Este processo consiste na montagem dos componentes internos do troço, necessários ao acesso e movimentação no interior da torre eólica, assim como ao seu funcionamento. A figura 32 mostra a zona de montagem dos “internos” e estes já montados num troço.

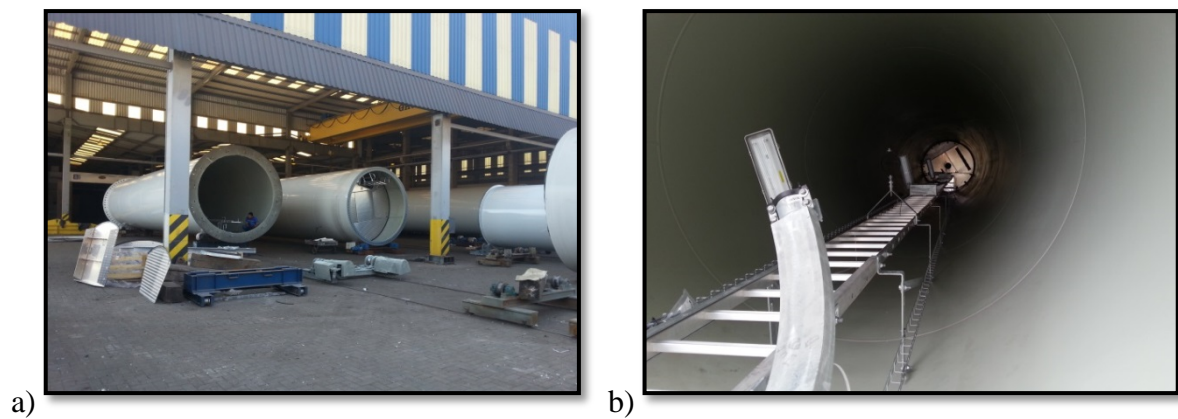


Figura 32 - Área de montagem de internos: a) Perspetiva da zona de montagem; b) Troço com os internos já montados.

Terminado o processo de acabamentos, a torre segue para armazenamento, estando pronta para ser expedida para a obra. É aqui que se fecha o fluxo produtivo de uma torre eólica no interior da Engebasa. A figura 33 ilustra o carregamento de um troço para expedição.



Figura 33 - Expedição de um troço.

5. PROJETO DE CARRO DE MOVIMENTAÇÃO

Neste capítulo descreve-se toda a fase de projeto e fabricação do protótipo do carro de movimentação cujo desenvolvimento foi proposto pela empresa para o decorrer do estágio. A principal condicionante de projeto obrigou a que o carro fosse tracionado e que servisse simultaneamente para os processos de decapagem e pintura dos troços, sendo capaz de suportar uma carga máxima de 80 toneladas.

O carro de movimentação destina-se a uma nova unidade de produção de torres eólicas da Engebasa, em fase de implementação na cidade de Porto Alegre. O *layout* da unidade está definido para que o carro seja tracionado de modo a completar a totalidade do processo produtivo do troço.

É de salientar que caso isso não aconteça não haverá forma de retirar os troços das cabines, tornando o processo de fabrico mais demorado e aumentando o custo de produção. Para o desenvolvimento deste projeto foi atribuída ao estagiário total liberdade de conceção, projeto e seleção de materiais.

5.1. Carros de Movimentação já Existentes

A primeira etapa para o desenvolvimento do carro de movimentação passou pela identificação das dificuldades existentes no atual processo produtivo da empresa. Assim, foram verificados os equipamentos existentes e analisado o processo produtivo com a finalidade de quantificar as limitações existentes.

Procedeu-se a um minucioso acompanhamento das operações de trabalho e métodos utilizados na empresa, que evidenciaram desde logo a limitação quanto à utilização de dois tipos de carros diferentes, um para a decapagem dos troços e um outro para a pintura dos troços. A figura 34 ilustra os carros utilizados.

Estes carros, apesar de terem características diferentes servem ambos para fazer movimentar o troço desde a fase de acabamento até às cabines e fazer a rotação das mesmas nos procedimentos de decapagem e pintura.

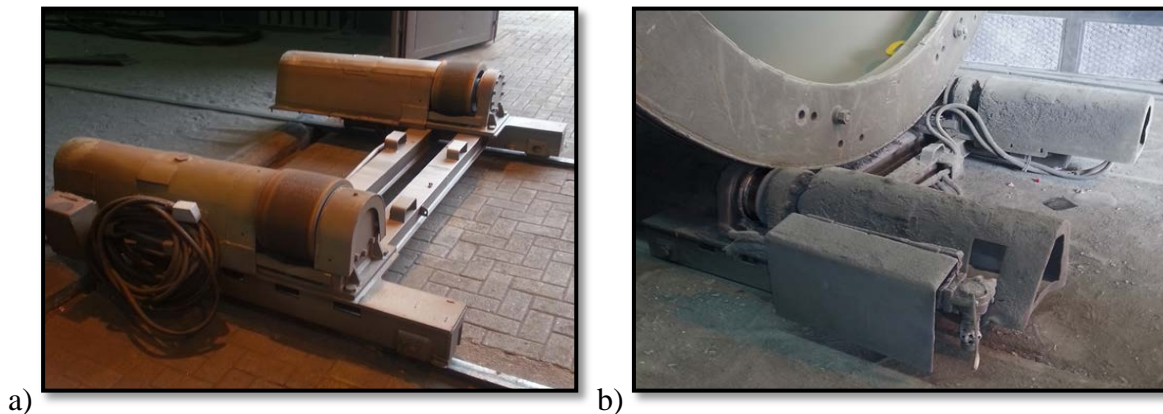


Figura 34 - Carros de movimentação existentes: a) Carro de decapagem; b) Carro de pintura.

O carro de decapagem é composto por dois motores elétricos, dois redutores e duas rodas revestidas com polipropileno onde assentam os troços, sendo uma livre e outro motriz. O carro de pintura é composto por um sistema pneumático devido a classificação da área de pintura e duas rodas do tipo roda de trilho onde a flange do troço vai girar.

Apesar de atenderem às exigências de fabricação, os carros apresentam limitações principalmente na sua forma de movimentação pelo facto de não serem tracionados, o que leva a que tenham de ser rebocados recorrendo a um empilhador. Além disso, tratando-se de dois carros, é necessário proceder à transição do troço de um carro para o outro. Estes aspetos tornam o processo produtivo muito demorado e perigoso. Na figura 35 é possível observar-se o método acima descrito.



Figura 35 - Movimentação do troço.

Perante a identificação das limitações existentes, colocou-se a questão: será possível projetar um único sistema de movimentação (do tipo carro) para fazer simultaneamente o percurso do troço desde a sua montagem, passando pelo processo de decapagem e de pintura, entregando-o na fase de armazenamento? Uma solução deste tipo permitiria reduzir os custos e tempos de produção.

Identificada a necessidade e a solução desejada, foi efetuada uma pesquisa de mercado para procurar se este tipo de solução já se encontrava implementada em alguma unidade fabril a nível mundial, ou se haveriam soluções que pudessem ser adaptadas ao pretendido. Da busca ao mercado, não foram identificadas soluções existentes do tipo “chave na mão” para o desejado. Foi assim decidido avançar para a conceção e projeto de uma nova solução.

5.2. Carro de Movimentação Projetado

O carro de movimentação que foi projetado encontra-se ilustrado na figura 36. Esta figura mostra a solução final, podendo identificar-se os vários sub-conjuntos do sistema. Nos sub-capítulos seguintes serão descritos sucintamente os passos que permitiram chegar a este carro de movimentação.

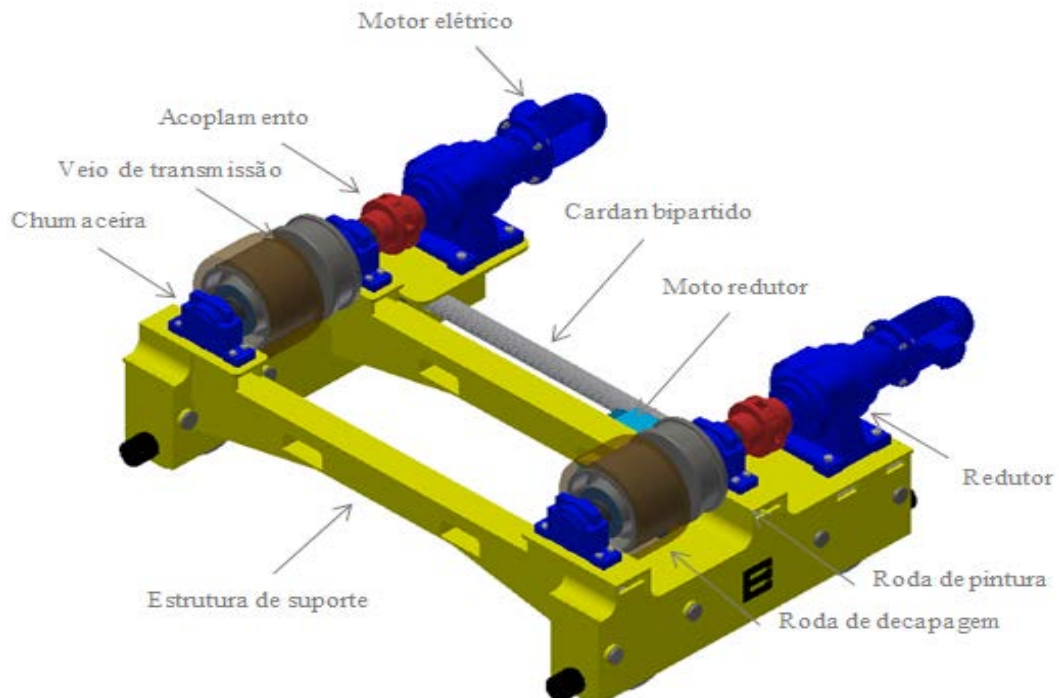


Figura 36 - Visualização 3D do carro de movimentação projetado.

5.2.1. Escolha dos Materiais

O projeto do carro iniciou-se com a seleção dos órgãos de movimentação adequados às necessidades de projeto. Pretendia-se um conjunto que pudesse ser aplicado para tracionar e rodar os troços. Da pesquisa efetuada ao mercado, assim como do diálogo tido com vários fabricantes, optou-se por selecionar um sistema de blocos de rodas da marca DEMAG (www.demagcranes.com.br). Estes equipamentos, utilizados principalmente para fazer a movimentação de pontes rolantes, serão utilizados para fazer a movimentação do carro. Estes blocos de rodas são dimensionadas para diferentes tipos de carga. O conjunto de movimentação, protegido estruturalmente, contém uma roda de trilho estriada com furação central, que é acoplada a um motor, permitindo assim a sua rotação (figura 37).



Figura 37 - Bloco de roda da marca DEMAG.

O bloco DEMAG é acoplado a um redutor com duas saídas. Uma das saídas faz a ligação a um dos blocos de rodas, e a outra a um *cardan* que traciona o outro bloco de roda. Assim, o sistema de movimentação tem a tração nas duas rodas, tal com mostra a figura 38. Cada carro contém quatro blocos de rodas, sendo que no caso do carro motriz dois desses blocos serão tracionados e no carro livre os quatro blocos de rodas são livres.

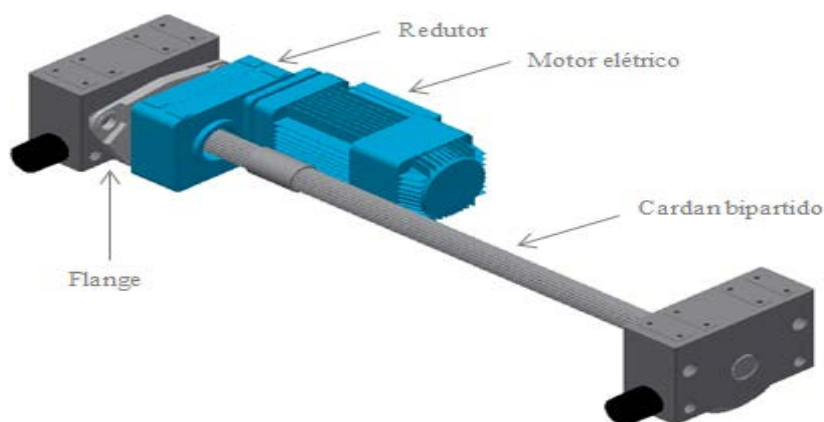


Figura 38 - Sub-conjunto de acionamento do carro de movimentação.

Os equipamentos foram dimensionados tendo em conta as exigências de projeto que se apresentam na tabela 1. Alguns dos dados foram obtidos a partir das exigências de projeto, nomeadamente: o carro deveria ter uma massa final até 1500 kg para poder ser facilmente transportado pela empilhadora entre ciclos de utilização; a capacidade máxima do carro foi definida tendo em conta a constante evolução tecnológica dos aerogeradores, que implica o aumento da massa dos troços; as velocidades de trabalho foram definidas de acordo com a carga a transportar e a experiência adquirida, tendo-se optado por uma velocidade baixa por razões de segurança. O comprimento do caminho de rolamento foi definido pelo *layout* da nova unidade fabril.

Tabela 1 - Exigências de projeto para dimensionamento dos blocos de rodas e do motor.

<i>Exigências de Projeto</i>	
<i>Designação</i>	<i>Valores</i>
Peso próprio cada carro	1500 kg
Capacidade do carro	80 000 kg
Velocidade máxima de translação	15 m/min
Velocidade mínima de translação	3.75 m/min
Comprimento do caminho de rolamento	120 m
Percursos com intervalos	30 m
Tensão de serviço	440/60 V/Hz
Regime de trabalho	Até 24 horas/dia
Temperatura ambiente	Até 40 °C
Tipo de ambiente	Fechado

Para o sistema de rotação do troço teve que se ter em conta o peso a ser suportado, as velocidades máximas e mínimas de rotação, as horas de trabalho e o ambiente trabalho. Além da massa a transportar, o motor foi selecionado tendo em conta uma velocidade de rotação baixa. Optou-se por selecionar um motor de 2 cv de 440 V de 1200 rpm, indicado pelo fabricante WEG (www.weg.com.br). Atendendo à velocidade de rotação na saída deste motor e aos objetivos pretendidos, foi necessário selecionar um redutor para baixar a velocidade de rotação na saída até 4 rpm (adequada às condições de trabalho). Selecionou-se um redutor do fabricante BREVINI PD 4065 (www.brevini.com.br). A figura 39 ilustra o modelo geométrico do motor e do redutor, fornecidos pelos fabricantes.

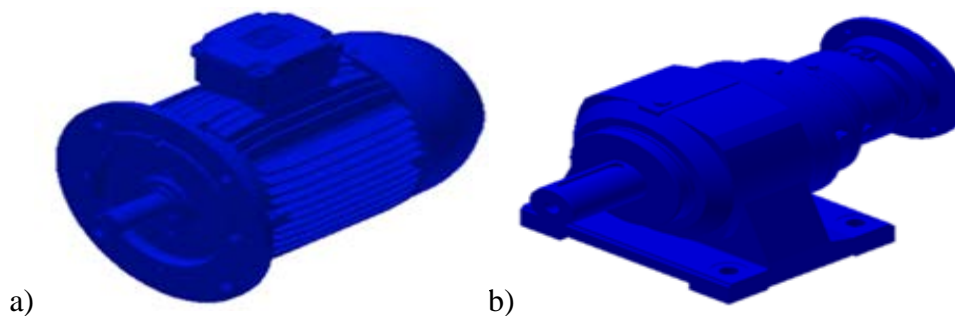


Figura 39 - a) Motor de rotação de troços; b) Redutor para ajuste da velocidade de rotação.

As chumaceiras a colocar nas extremidades dos veios foram selecionadas tendo em conta o peso a suportar, o ângulo de aplicação da força, e o diâmetro do veio a ser aplicado. Com a definição desses dados foi selecionada uma chumaceira da marca FCM com uma caixa NSBP 16 (figura 39). A garantia de movimento de rotação na saída do redutor para o veio de transmissão impõe a utilização de um conjunto de acoplamentos, que foram selecionados tendo em conta o diâmetro do veio e da saída do redutor, a velocidade de rotação na saída do redutor, o binário, e o fator de serviço. Os dados conduziram à seleção de um acoplamento da marca, ANTARES WRAP SW 280 (www.ataresacoplamentos.com.br) ilustrado na figura 39. Para as rodas de decapagem como para as rodas da pintura, foram selecionados anéis de fixação da marca IMETEX RFN 7012 (www.imetex.com.br) (figura 40). Os anéis foram dimensionados tendo em conta a sua dimensão, a carga axial aplicada sobre eles e o binário.

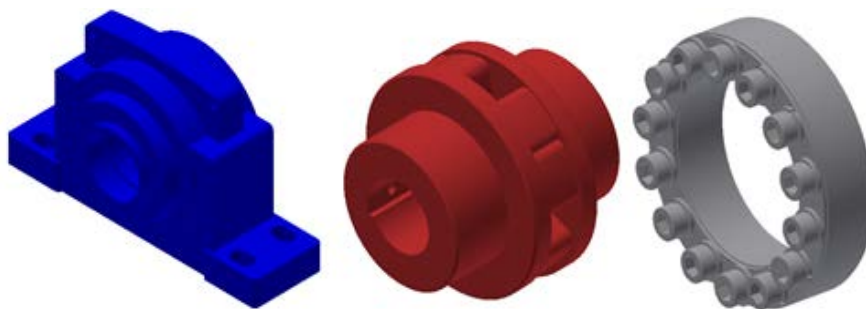


Figura 40 - Geometria 3D da chumaceira FCM, acoplamento ANTARES e anel IMETEX.

Importa referir que a seleção e indicação dos componentes atrás referidos foram feitas pelos próprios fabricantes, havendo apenas um acompanhamento dos critérios e condicionantes de projeto. Os dados de base consistiam na necessidade de sustentação de uma

massa até 80 toneladas, com a geometria do troço, e de modo a garantir uma velocidade de rotação máxima de 4 rpm.

5.2.2. Dimensionamento e Cálculo Estrutural

Tendo em conta a seleção dos diversos componentes atrás descritos, e todas as suas características, seguiu-se a fase de dimensionamento e cálculo estrutural dos restantes elementos estruturais do carro. De entre estes elementos, destacando-se os seguintes: 5.2.2.1. Estrutura de suporte; 5.2.2.2. Veio de transmissão; 5.2.2.3. Roda de decapagem; 5.2.2.4. Roda de pintura. Nos sub-capítulos seguintes apresenta-se uma descrição dos cálculos efetuados que conduziram à geometria final. Toda a modelação geométrica dos diversos componentes do carro, assim como as suas montagens foi efetuada com recurso ao *software* Inventor.

O cálculo estrutural foi feito com recurso ao *software* de elementos finitos Solidworks Simulation. Em todos os modelos que se apresentam, a malha de elementos finitos foi definida a partir do elemento sólido tetraédrico parabólico, com 6 arestas curvas, 4 nós nos vértices e 6 nós no meio das arestas.

Cada nó tem 3 graus de liberdade, que representam as três translações nas três direções ortogonais, x, y e z. Este elemento finito, com a designação SOLID da biblioteca do *software* representa-se esquematicamente na figura 41.

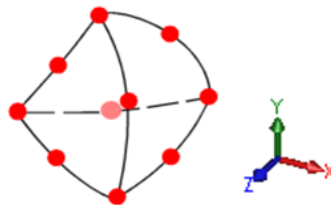


Figura 41 - Representação esquemática do elemento SOLID da biblioteca do Solidworks Simulation.

5.2.2.1. Estrutura de Suporte

A estrutura de suporte foi alvo de várias iterações e ajustes até se obter a geometria final. A figura 42 mostra 4 das estruturas de suporte que foram estruturalmente estudadas, tendo sido abandonadas por não cumprirem os critérios de resistência e rigidez para a estrutura.

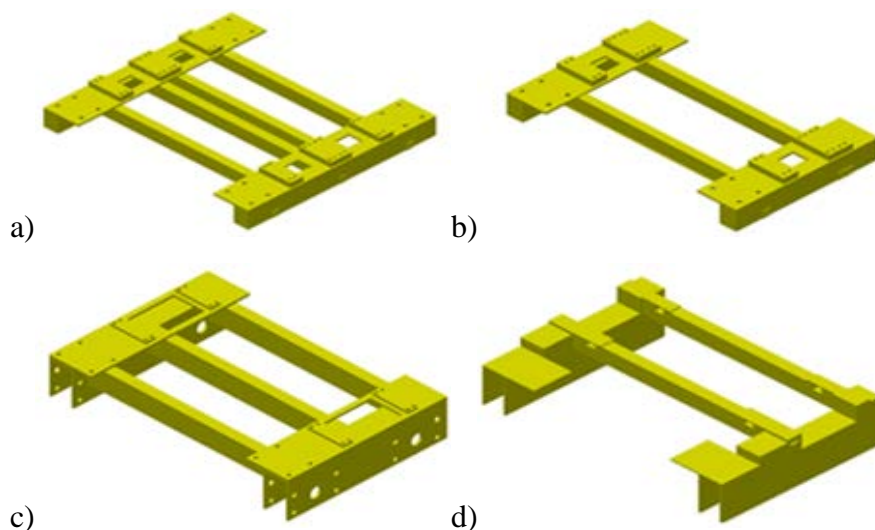


Figura 42 - Geometria 3D de algumas estruturas de suporte desenvolvidas.

Na sequência dos ajustes nas estruturas estudadas, tanto ao nível de cálculo estrutural como dos materiais adequados, obteve-se a estrutura de suporte ilustrada na figura 43.

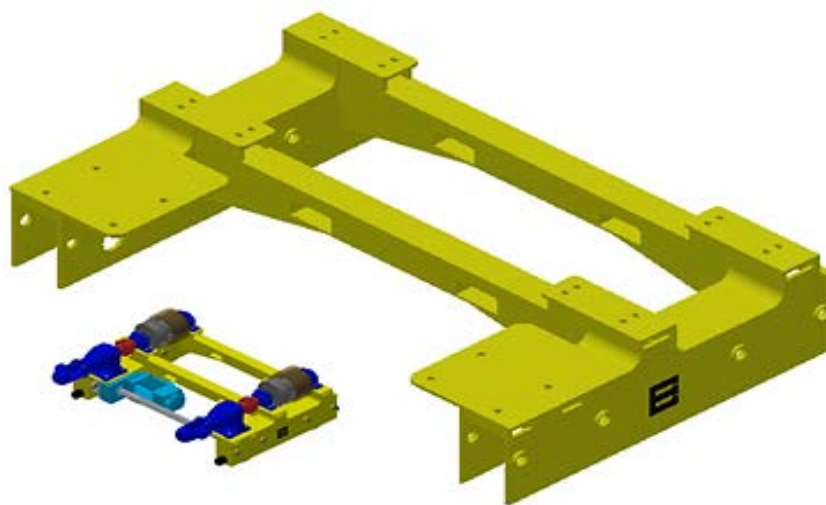


Figura 43 - Estrutura de suporte final.

A estrutura de suporte é o elemento estrutural que permite a fixação dos blocos de rodas, das chumaceiras e dos redutores de rotação. Esta estrutura tem quatro pontos de apoio para fixação das chumaceiras e dois pontos para fixação dos redutores.

Por razões de características dimensionais, nomeadamente de modo a permitir o acoplamento dos blocos de rodas, assim como por imposição de condições de projeto, a estrutura tem as dimensões globais da figura 44.

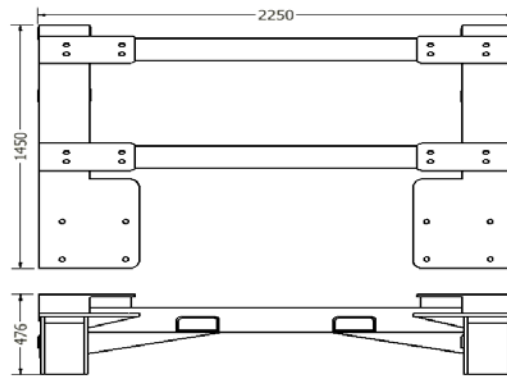


Figura 44 - Geometria e dimensões da estrutura de suporte [mm].

A estrutura suporta uma total de 80 toneladas (metade da massa total máxima do troço), que se divide de acordo com o ângulo de assentamento do troço nas rodas. O ângulo de ancoragem na roda em relação ao plano vertical varia entre 45° e 51°. Considera-se nos cálculos o menor ângulo, que conduz a uma força resultante de 556595 N com uma inclinação de 45°. O comprimento total da estrutura de suporte é de 1450 mm e a largura de 2250 mm, sendo esta construída a partir de chapa de aço ASTM A36 com 15.9 mm de espessura.

Este aço não apresenta as mesmas características mecânicas e metalúrgicas que os aços especiais, contudo, foram considerados por razões de custos, sendo as suas características adequadas. As características mecânicas do ASTM A36 estão descritas na tabela 2.

Tabela 2 - Características mecânicas do aço ASTM A36 fornecidas pelo fabricante.

	σ_{ced} [MPa]	E [GPa]	HB	ϵ_R [%]	ρ [kg/m ³]
ASTM A36	250	200	120	20	7850

Na figura 45 representa-se o modelo de elementos finitos da estrutura de suporte. O modelo considera a superfície da parte inferior da estrutura com todos os graus de liberdade bloqueados.

Este procedimento de configuração das condições de fronteira mostra-se a adequado, dada a rigidez da roda no trilho. As condições de carga consideram uma distribuição nas 4 superfícies que fazem a ligação às chumaceiras, com o valor de 395182 N (componente vertical da força). A componente horizontal é aplicada nas zonas de ligação dos parafusos, também com o valor de 395182 N, e em direcções opostas. Atendendo a que a estrutura é

constituída por diversos elementos unidos entre si por processo de soldadura, o modelo considera uma modelação de contacto do tipo *bonded*.

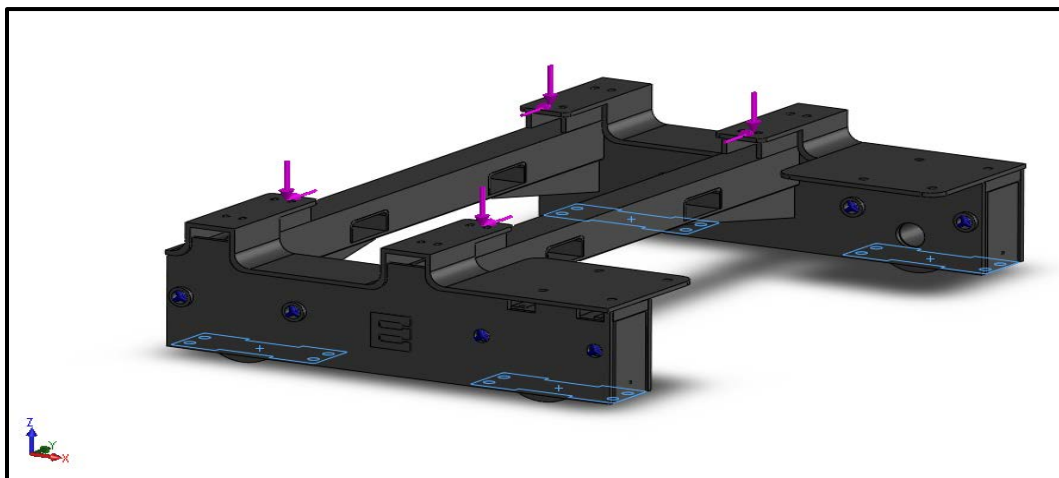


Figura 45 - Modelo de elementos finitos da estrutura de suporte.

O modelo final obtido conduz a uma malha com 657709 elementos, com uma espessura média de 15 mm e uma percentagem de elementos com relação de aspeto inferior a 3 de 99.2 % (figura 46).

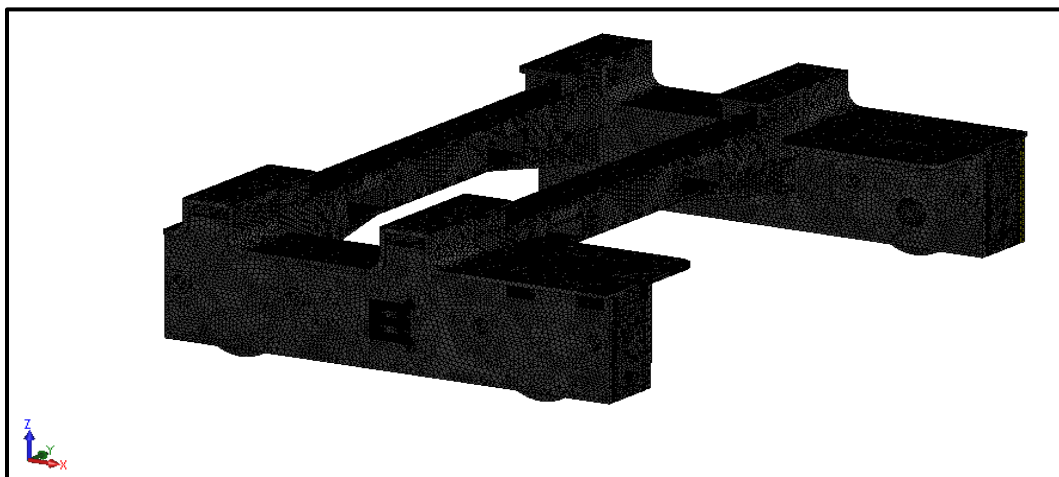


Figura 46 - Malha de elementos finitos da estrutura de suporte.

Nas figuras 47 e 48 apresenta-se a distribuição global de tensões de von Mises, assim como a distribuição de isovalores para tensões superiores a 100 MPa. Uma observação dos valores obtidos mostra que a tensão máxima apresenta um valor de 157.2 MPa, inferior à tensão de cedência do material, e com um coeficiente de segurança de 1.3, aceitável para a

aplicação em estudo. Estes dados evidenciam que a estrutura é suficientemente resistente para as condições de projeto.

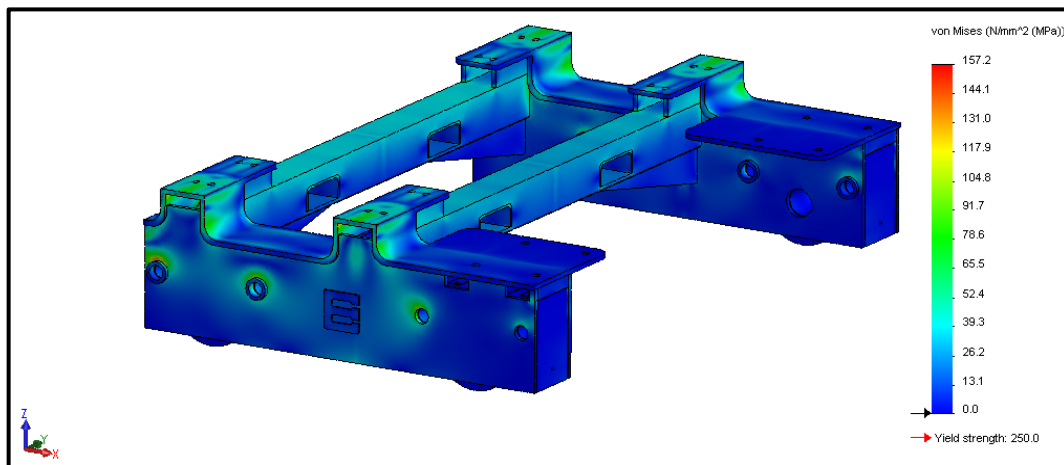


Figura 47 - Distribuição global das tensões de von Mises.

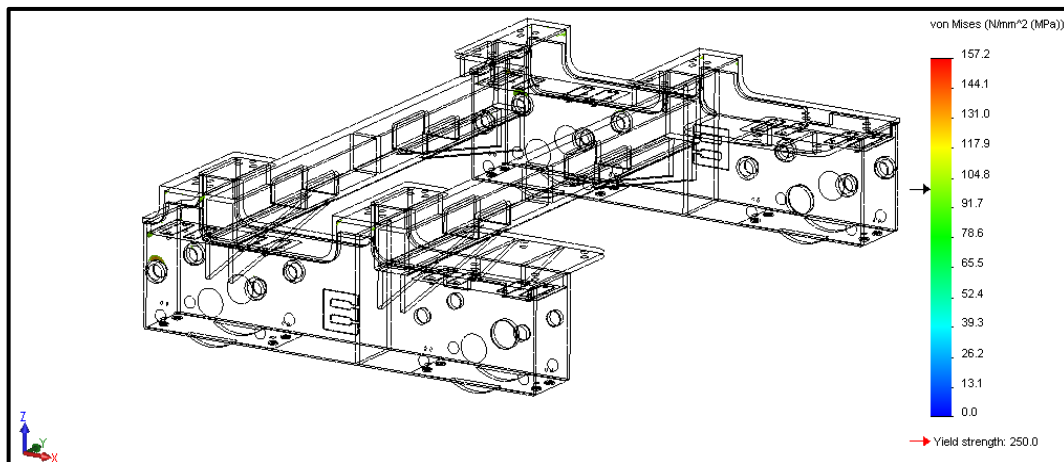


Figura 48 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 100 MPa.

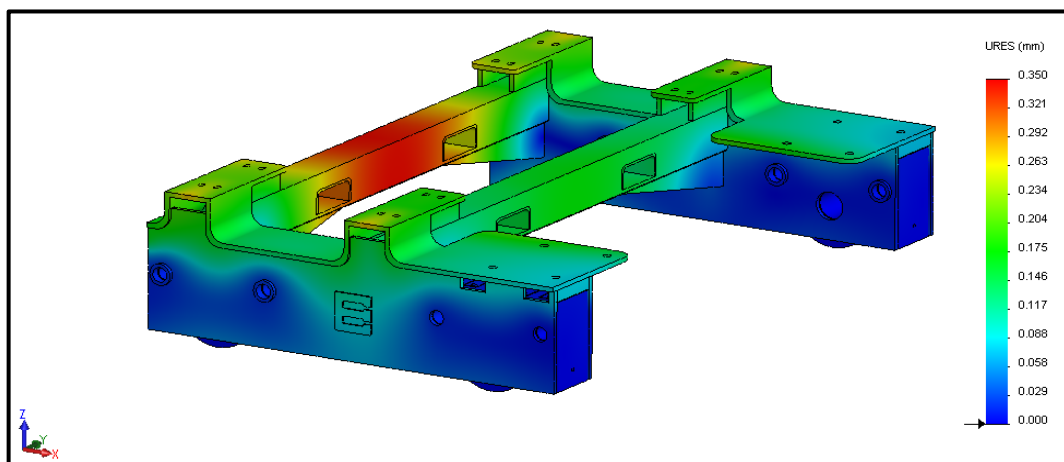


Figura 49 - Distribuição global dos deslocamentos equivalentes.

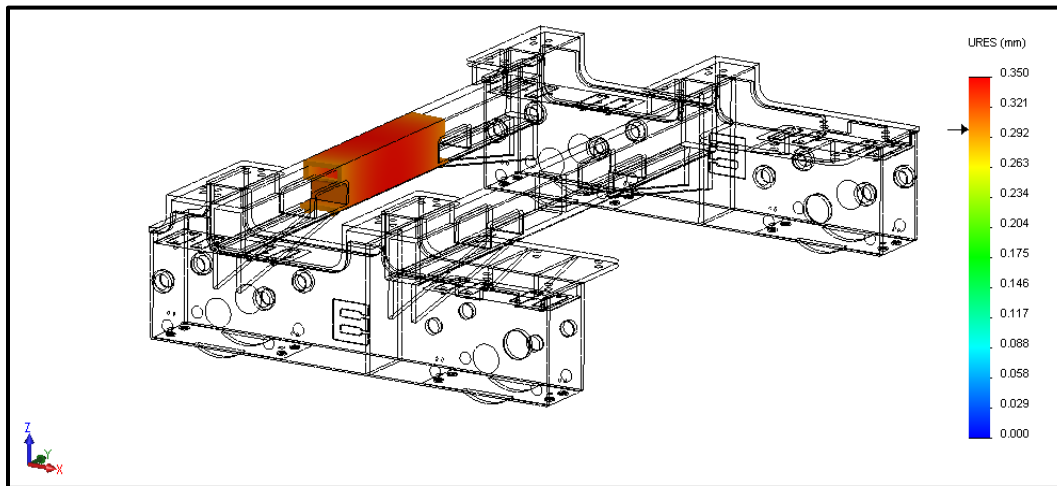


Figura 50 - Distribuição de isovalores dos deslocamentos equivalentes - 0.3 mm.

As figuras 49 e 50 mostram a distribuição dos deslocamentos equivalentes, assim como os isovalores para 0.3 mm. Tal como se pode observar, o deslocamento máximo equivalente tem o valor de 0.35 mm, o que tendo em conta o comprimento da viga do carro conduz a uma relação de rigidez superior a $L/3200$.

5.2.2.2. Veio de Transmissão

O veio de transmissão é o elemento estrutural que permite a fixação e rotação da roda de decapagem e da roda de pintura. O veio tem na sua extremidade um acoplamento ao redutor, tal como se representa na figura 51.

Por razões dimensionais, nomeadamente de modo a ser acoplado nas duas chumaceiras da figura, assim como no acoplamento, por imposição das condições de projeto, o veio tem a geometria e dimensões apresentadas na figura 52.

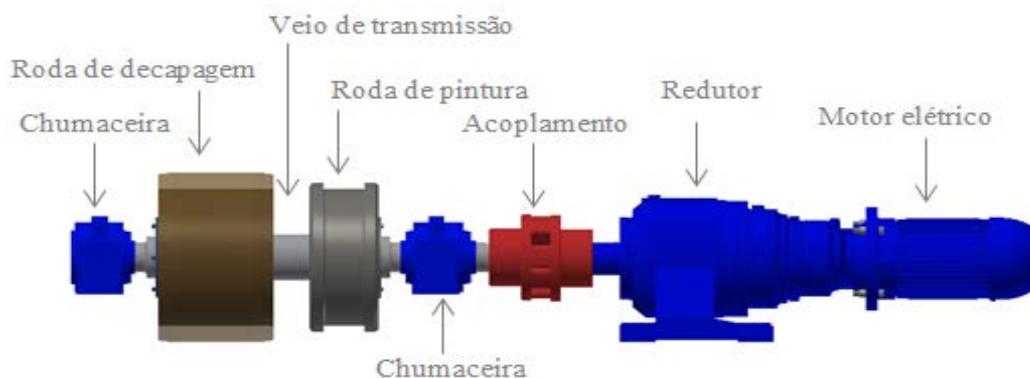


Figura 51 - Visualização 3D da integração do veio no conjunto motor.

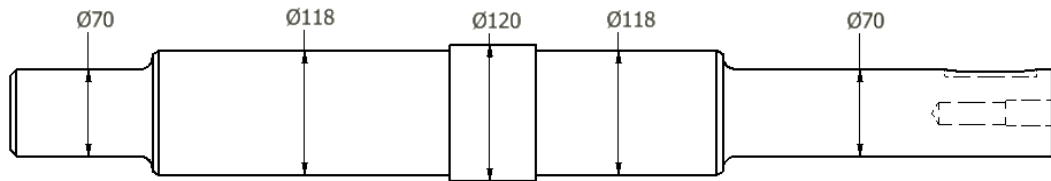


Figura 52 - Geometria e dimensões do veio [mm].

O veio suporta uma massa de 40 toneladas e o seu comprimento total é de 849.5 mm, com troços de seção variável. Também neste caso se considera o ângulo de 45°, conduzindo a uma carga no veio de 556595 N. O material de construção do veio é o aço SAE 4140, dadas as suas características, nomeadamente a resistência, tenacidade e dureza.

No seu processo de fabrico, o veio é submetido a um procedimento de aumento de dureza para o intervalo de 280 HB a 320 HB. As características mecânicas do material encontram-se descritas na tabela 3.

Tabela 3 - Características mecânicas do aço SAE 4140 fornecidas pelo fabricante.

	σ_{ced} [MPa]	σ_{rut} [MPa]	E [GPa]	HB	ϵ_R [%]	ρ [kg/m ³]
SAE 4140	910	1450	205	240	19.2	7850

A verificação estrutural do veio foi feita com base no Código ASME (Torres, 2001), assim como com recurso ao método dos elementos finitos. Analisam-se as duas situações de solicitação, nomeadamente o assentamento do troço na roda de decapagem (caso 1) e na roda de pintura (caso 2). A figura 53 apresenta os diagramas de esforços para os dois casos.

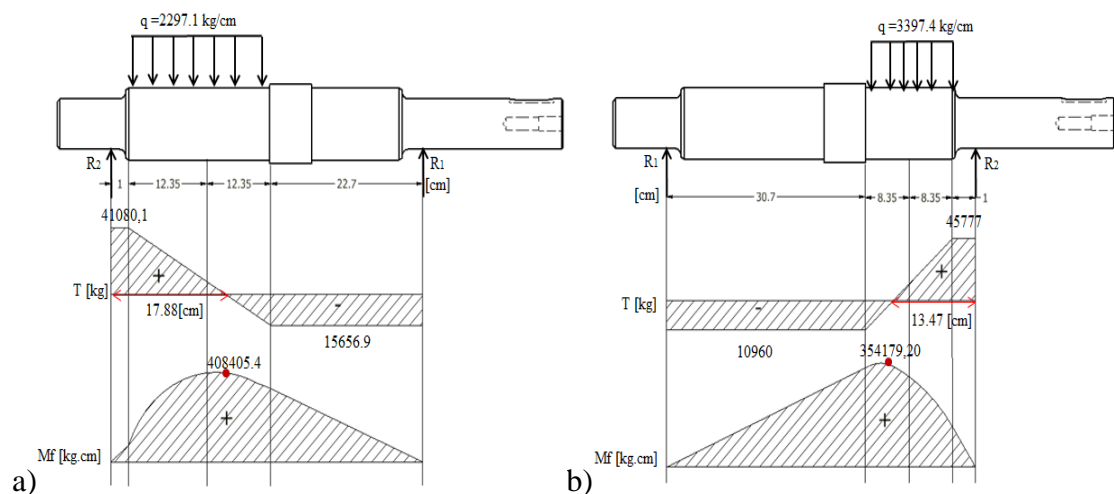


Figura 53 - Diagramas de esforços transversos e momentos fletores: a) Caso 1; b) Caso 2.

O momento fletor máximo verifica-se no caso 1, com o valor de máximo de 408405.4 [kg.cm] no troço de aplicação de carga. O valor do momento torsor no veio obtém-se aplicando a expressão 1. Sabendo que a potência na entrada é $P = 2$ cv e a velocidade de rotação do veio é de 4 rpm, o momento torsor assume o valor $M_t = 35810$ [kg.cm].

$$M_t = 71620 \cdot \frac{P}{n} \quad (1)$$

Pelo código ASME:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \times \tau_{adm}} \sqrt{\left(k_f M_f + \frac{ND\alpha(1+K^2)}{8}\right)^2 + (k_t M_t)^2}} \quad (2)$$

Como o veio é maciço ($K=0$), e não se considerando esforços axiais ($N=0$), a expressão fica:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \times \tau_{adm}} \sqrt{(k_f M_f)^2 + (k_t M_t)^2}} \quad (3)$$

Atendendo a que o veio é chavetado e tendo em conta as características mecânicas do material, a tensão tangencial admissível assume o menor dos seguintes valores:

$$\tau_{adm} = \text{Minimo}(0,75 \times 0,3 \times \sigma_{ced}; 0,75 \times 0,18 \times \sigma_{rut}) \quad (4)$$

Ou seja, $\tau_{adm} = 1996$ [kg/cm²] Considerando carga gradualmente aplicada, o coeficiente de choque e fadiga aplicado ao momento fletor, $k_f=1.5$ e o coeficiente de choque e fadiga aplicado ao momento torsor $k_t=1.5$. Substituindo os valores na expressão (3), obtém-se um diâmetro para o veio $d \geq 11.8$ [cm]. A tensão de corte máxima para $d = 11.8$ [cm] é obtida pela expressão (5), tendo o valor $\tau_{m\acute{a}x} = 1900$ [kg/cm²] abaixo da tensão corte admissível.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{16}{\pi \times d^3} \sqrt{(k_f M_f)^2 + (k_t M_t)^2} \quad (5)$$

Considera-se assim o diâmetro $d = 11.8$ [cm] nos troços de acoplamento das rodas, tal como representado na figura 52. O diâmetro menor, correspondente aos troços de ligação às chumaceiras e ao acoplamento, foi obtido com o mesmo procedimento, considerando um momento fletor máximo de 45777 [kg.cm] e o mesmo valor de momento torsor. A análise

conduziu a um diâmetro $d \geq 5,4$ [cm], tendo-se considerado $d=7$ [cm], tal como representado na figura 52.

Na análise por elementos finitos considera-se apenas a situação mais desfavorável, correspondente ao caso 1. Na figura 54 apresenta-se o modelo de elementos finitos do veio. Consideram-se as extremidades apoiadas, sendo restringidos todos os graus de liberdade do modelo na superfície de contacto. O modelo considera uma malha de elementos finitos com 52108 elementos e uma espessura média de 10 mm (figura 55). Uma percentagem de elementos com relação de aspeto inferior a 3 de 99.1 %.

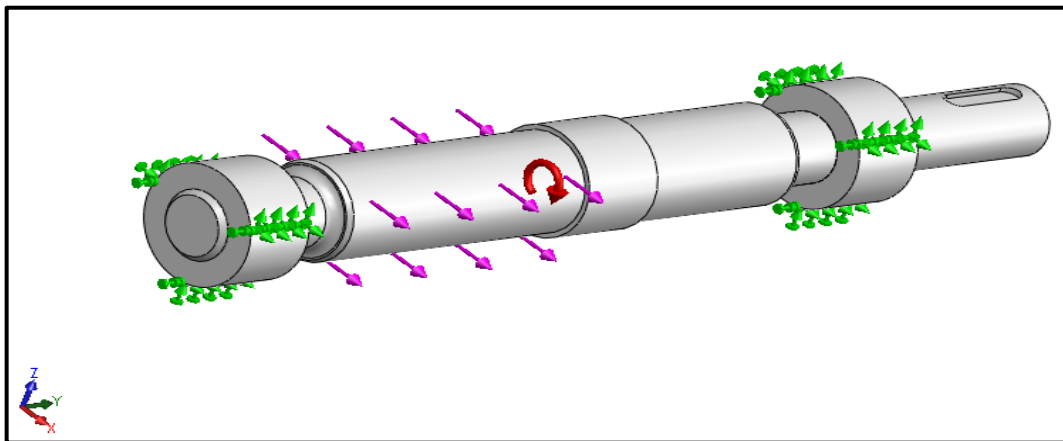


Figura 54 - Modelo de elementos finitos do veio de transmissão.

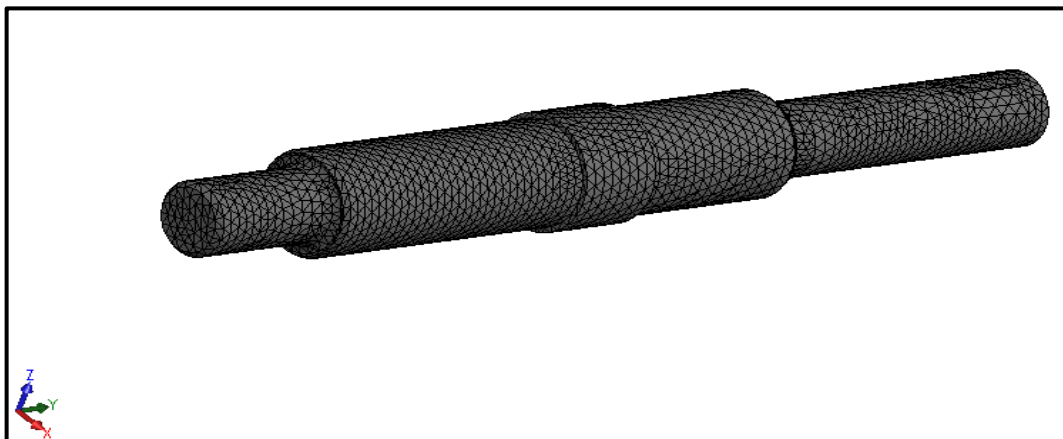


Figura 55 - Malha de elementos finitos do veio de transmissão.

Nas figuras 56 a 59 apresentam-se a distribuição de tensões de von Mises e dos deslocamentos equivalentes, assim como os isovalores a 0.9 mm. Tal como se pode observar, a tensão máxima ocorre com um valor de 462.1 MPa, inferior à tensão de cedência do material, e com um coeficiente de segurança de 2 mostrado que o veio é suficientemente

resistente para a aplicação. Relativamente à sua rigidez, o veio apresenta um deslocamento transversal máximo de 1.33 mm, que conduz a uma relação $L/640$, evidenciando uma rigidez aceitável para o projeto em análise.

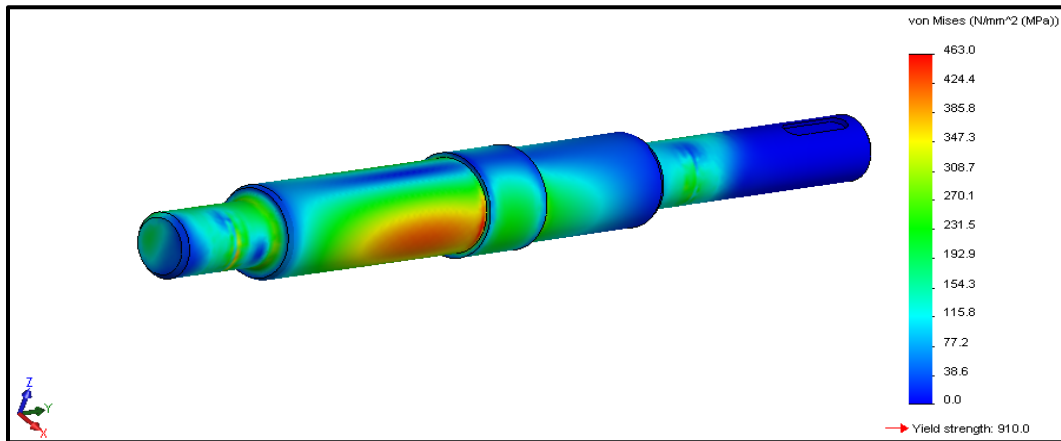


Figura 56 - Distribuição das tensões de von Mises.

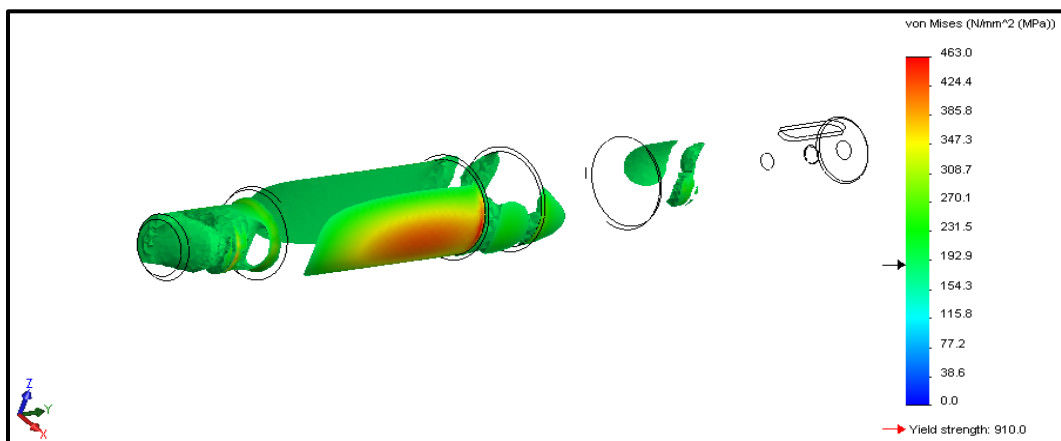


Figura 57 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 187 MPa.

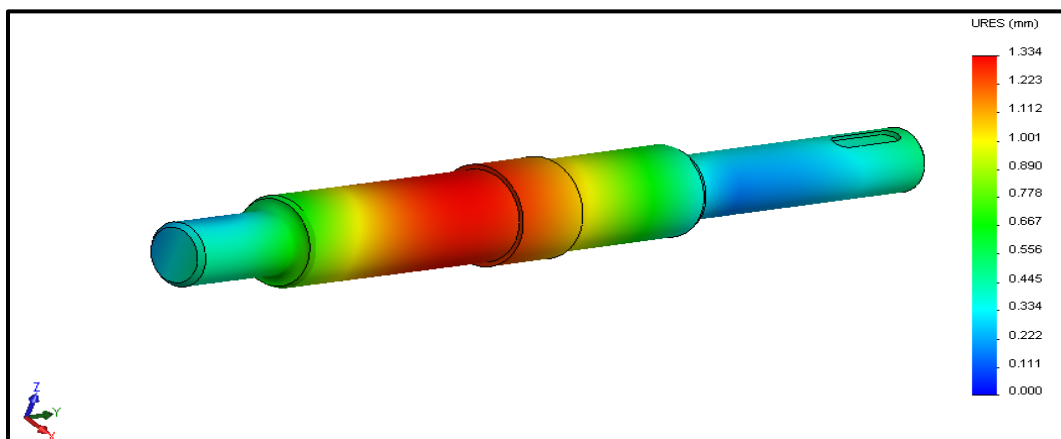


Figura 58 - Distribuição dos deslocamentos equivalentes.

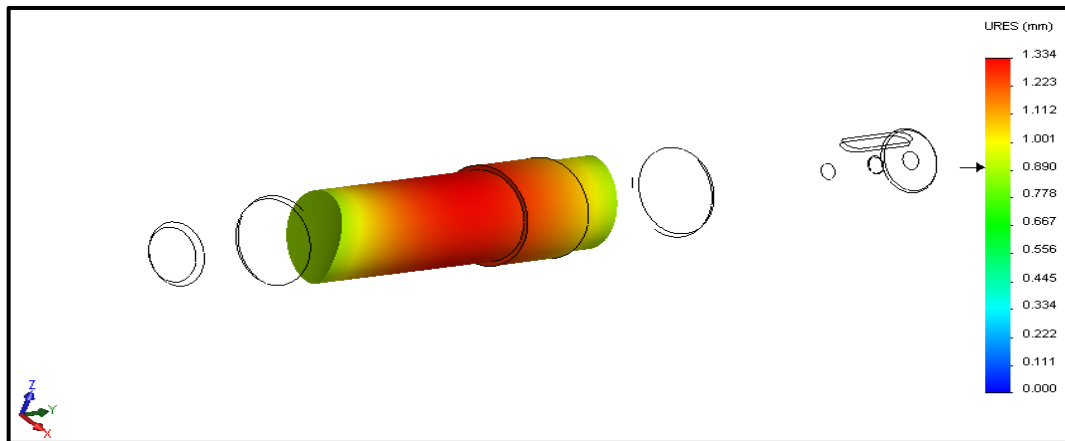


Figura 59 - Distribuição de isovalores dos deslocamentos equivalentes - 0.9 mm.

5.2.2.3. Roda de Decapagem

A roda de decapagem é o elemento de contacto ao troço durante o processo de decapagem. De facto, o troço encontra-se apoiado nas duas rodas de decapagem, sendo a geometria da roda definida para ser acoplada no veio e conter o anel de fixação no seu interior. A roda, cujo modelo 3D se apresenta na figura 60, contém algumas ranhuras para redução do seu peso.

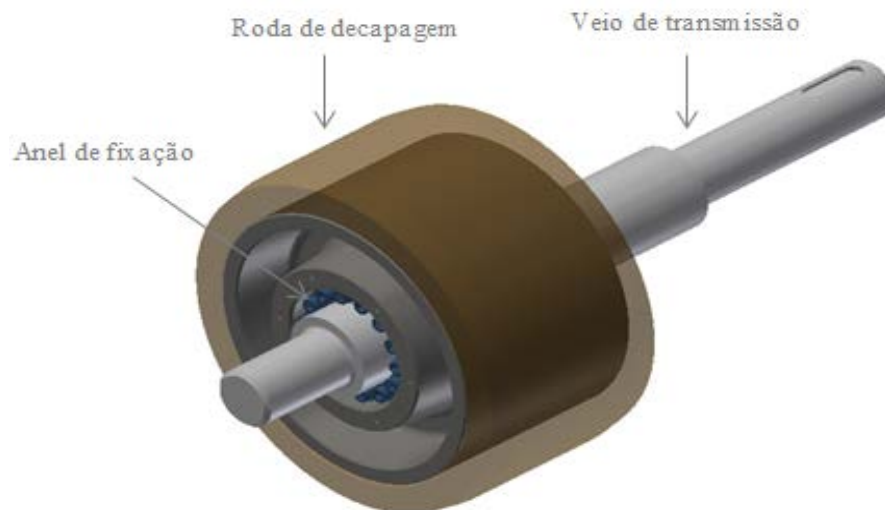


Figura 60 - Roda de decapagem aplicada no veio.

Por razões dimensionais, nomeadamente de modo a ser acoplada no veio, assim como por imposição de condições de projeto a roda tem as dimensões apresentadas na figura 61.

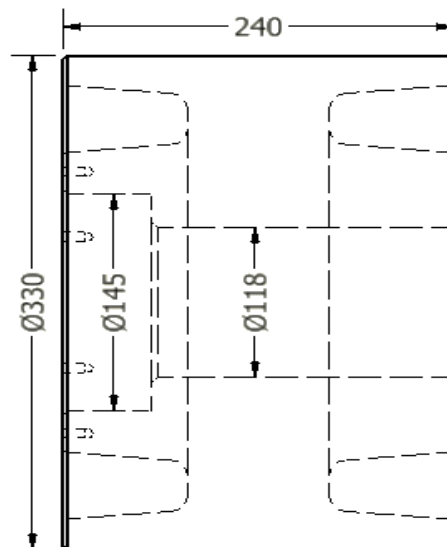


Figura 61 - Geometria e dimensões da roda de decapagem [mm].

A roda, que terá de suportar uma carga até 40 toneladas, tem como material de construção o aço SAE 1020, dadas as suas características, nomeadamente a facilidade de maquinagem, alta tenacidade, baixa dureza, fácil soldabilidade e a boa relação custo/benefício. A roda, depois de maquinada, é revestida com poliuretano dureza 75-Shore D, em toda a zona de contacto com o troço. As características mecânicas do material encontram-se descritas na tabela 4. Também neste caso se considera o ângulo de 45°, conduzindo a uma carga de 556595 N na roda. O cálculo para a determinação da força tangencial na roda conduz a um valor de 1085 N.

Tabela 4 - Características mecânicas do aço ASE 1020 fornecidas pelo fabricante.

	σ_{ced} [MPa]	E [GPa]	HB	ε_R [%]	ρ [kg/m ³]
ASE 1020	351.2	200	121	15	7870

A verificação estrutural da roda de decapagem foi feita com recurso ao método dos elementos finitos (figura 62). Consideram-se a superfície de ligação ao veio com todos os graus de liberdade restringidos.

A solicitação da roda considera a distribuição da massa do troço, definindo-se uma zona de contacto. O modelo considera uma malha com 183346 elementos, com uma dimensão média de 10 mm e uma percentagem de elementos com relação de aspeto inferior a 3 de 99 %

(figura 63). Atendendo ao grau de utilização, conjugada com a velocidade de rotação, optou-se por não proceder a qualquer análise à fadiga.

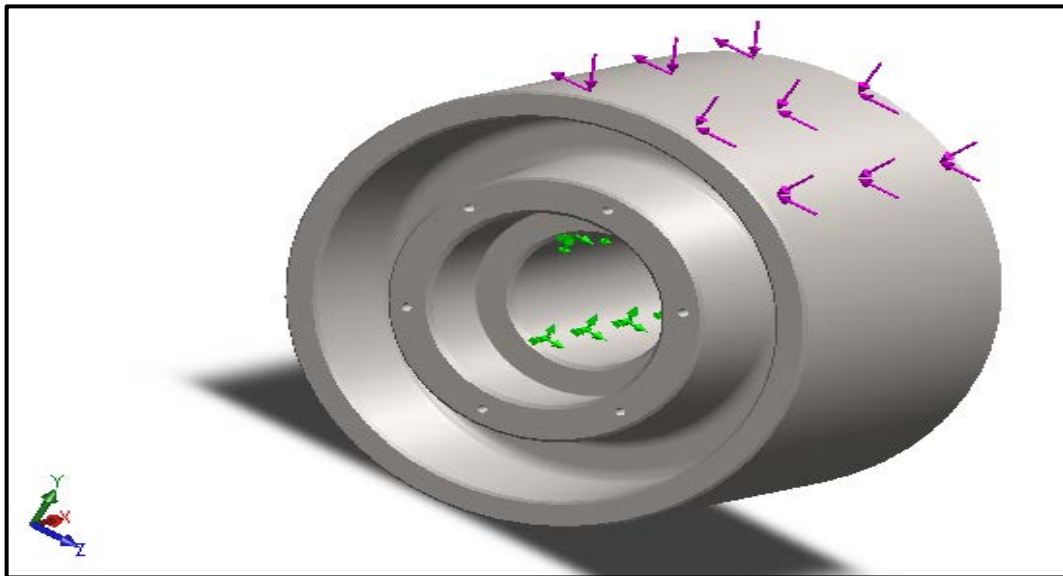


Figura 62 - Modelo de elementos finitos da roda de decapagem.

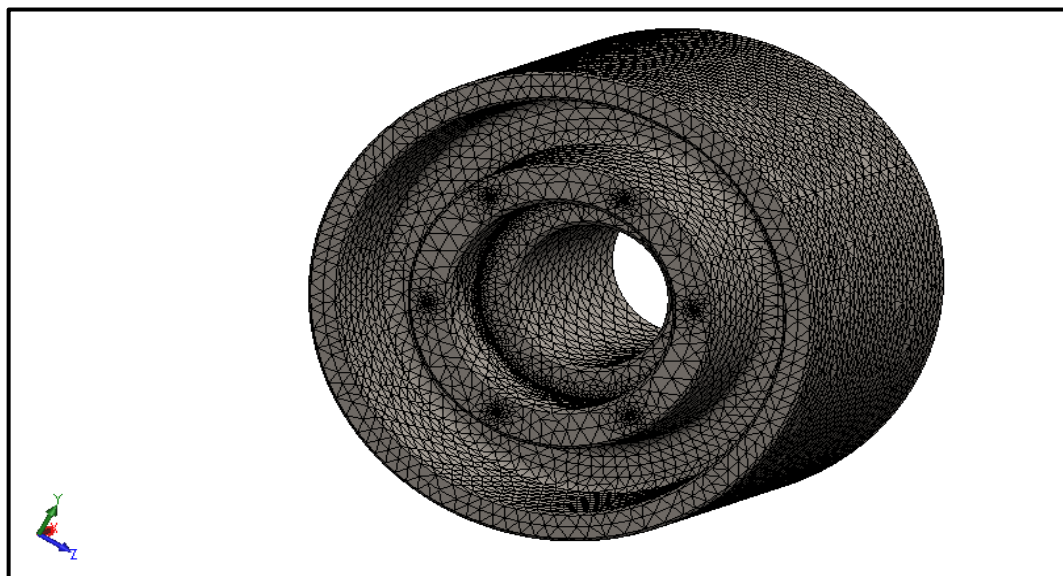


Figura 63 - Malha de elementos finitos da roda de decapagem.

Nas figuras 64 a 67 ilustram-se a distribuição de tensões de von Mises e dos deslocamentos equivalentes na roda.

Tal como se pode observar, a tensão máxima tem o valor máximo de 203.5 MPa, inferior à tensão de cedência do material, e com um coeficiente de segurança de 1.7. O deslocamento equivalente máximo tem o valor de 0.15 mm. Perante os resultados obtidos, pode-se afirmar que a roda se encontra bem dimensionada.

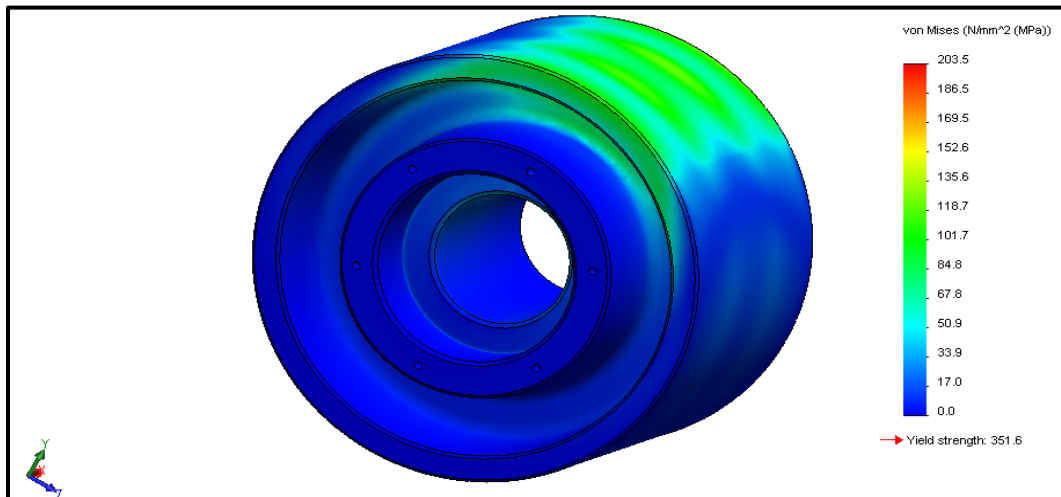


Figura 64 - Distribuição das tensões de von Mises.

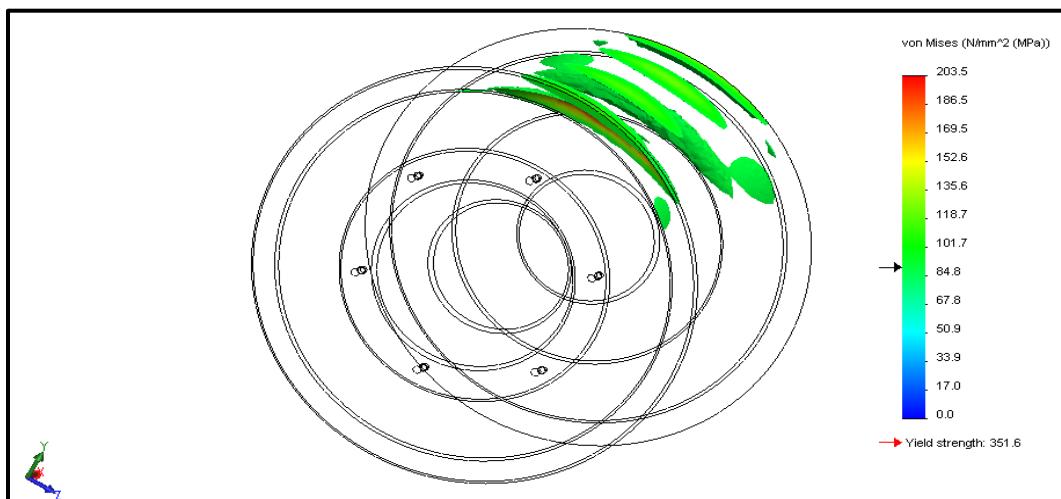


Figura 65 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 90 MPa.

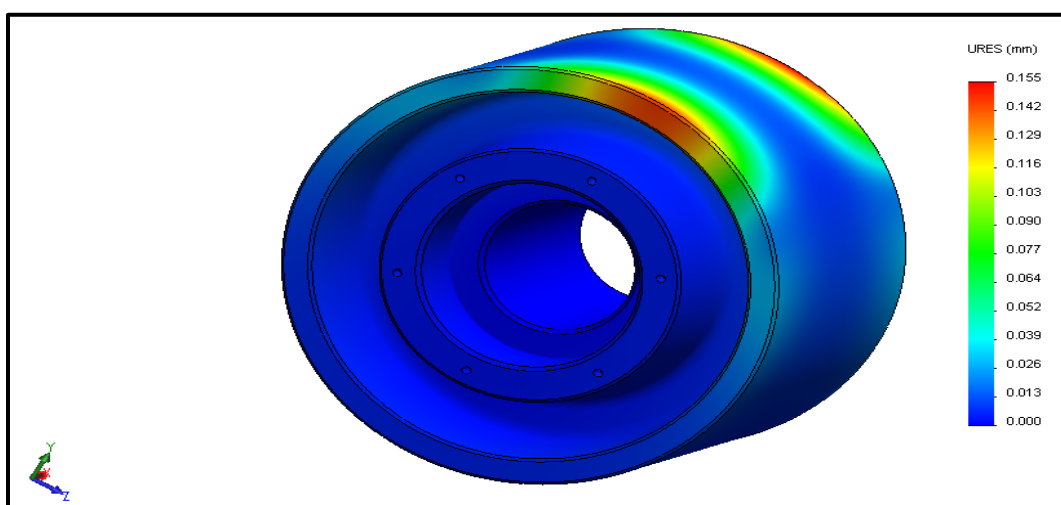


Figura 66 - Distribuição dos deslocamentos equivalentes.

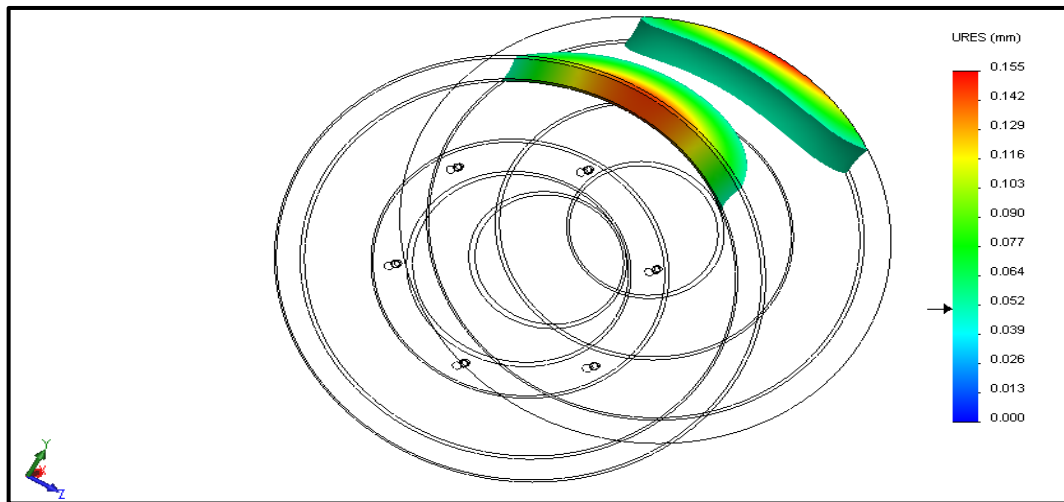


Figura 67 - Distribuição de isovalores dos deslocamentos equivalentes - 0.05 mm.

5.2.2.4. Roda de Pintura

A roda de pintura (figura 68) é o elemento de contacto ao troço durante o processo de pintura. A geometria da roda foi definida para ser acoplada no veio e conter o anel de fixação no seu interior.

Por razões dimensionais, nomeadamente de modo a ser acoplada no veio, assim como por imposição de condições de projeto, a roda tem as dimensões apresentadas na figura 69.

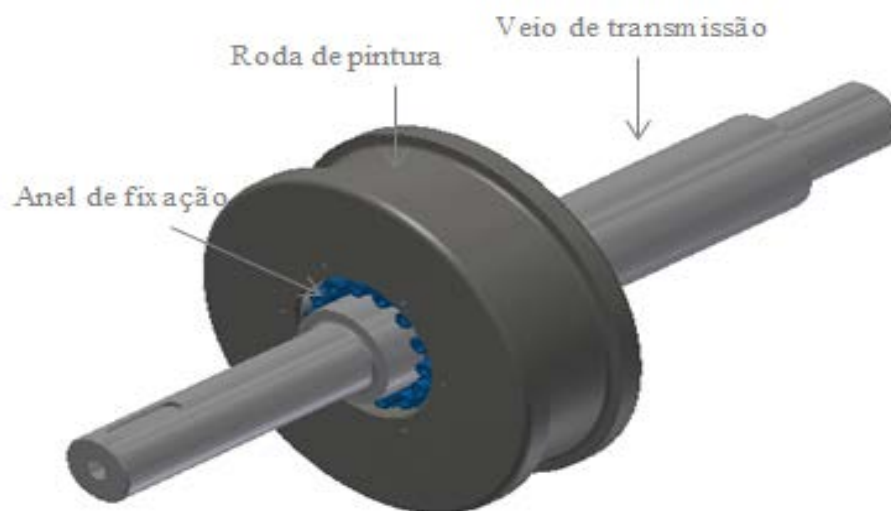


Figura 68 - Geometria 3D da roda de pintura acoplada ao veio.

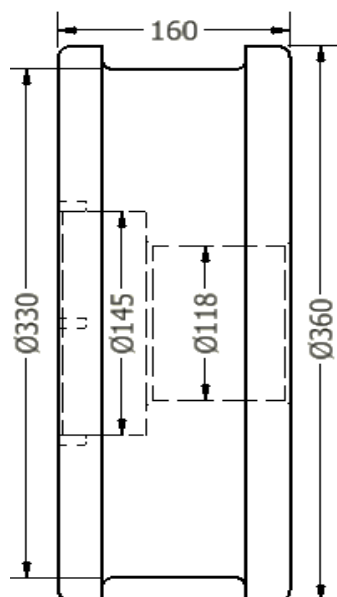


Figura 69 - Dimensões da roda de pintura [mm].

A roda suporta uma carga de 40 toneladas, tendo um diâmetro externo de 360 mm e material de construção Aço SAE 4140 dadas as suas características, nomeadamente a alta resistência, alta tenacidade e alta dureza. As características mecânicas do material encontram-se descritas na tabela 5. Também neste caso se considera o ângulo de 45°, conduzindo a uma carga de 556595 N na roda. O cálculo para a determinação da força tangencial na roda conduz a um valor de 1085 N.

Tabela 5 - Características mecânicas do aço SAE 4140 fornecidas pelo fabricante.

	σ_{ced} [MPa]	E [GPa]	HB	ϵ_R [%]	ρ [kg/m ³]
SAE 4140	910	205	240	19.2	7850

No seu processo de fabrico, a roda de pintura é submetida a um procedimento de aumento de dureza para o intervalo de 280 HB a 320 HB.

A verificação estrutural da roda de pintura foi feita com recurso ao método dos elementos finitos. Na figura 70 apresenta-se o modelo de elementos finitos da roda, que considera uma malha com 245724 elementos, com uma espessura média de 10 mm e uma percentagem de elementos com relação de aspeto inferior a 3 de 99.4 % (figura 71).

Consideram-se a superfície de ligação ao veio com todos os graus de liberdade

restringidos. A solicitação da roda considera a distribuição da massa do troço, definindo-se uma zona de contacto.

Atendendo ao grau de utilização conjugada com a velocidade de rotação, optou-se por não proceder a qualquer análise à fadiga.

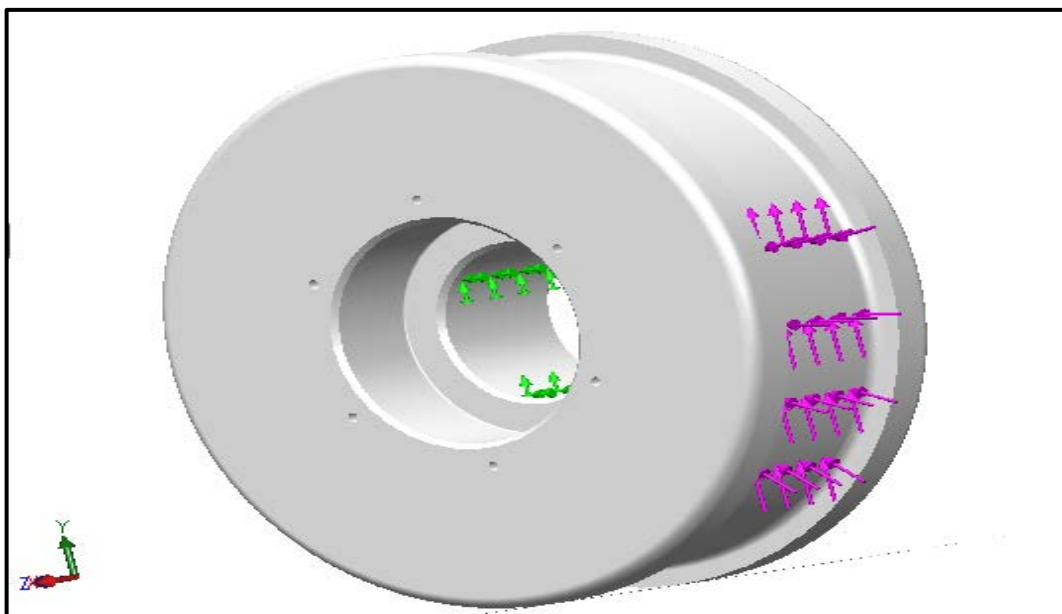


Figura 70 - Modelo de elementos finitos da roda da pintura.

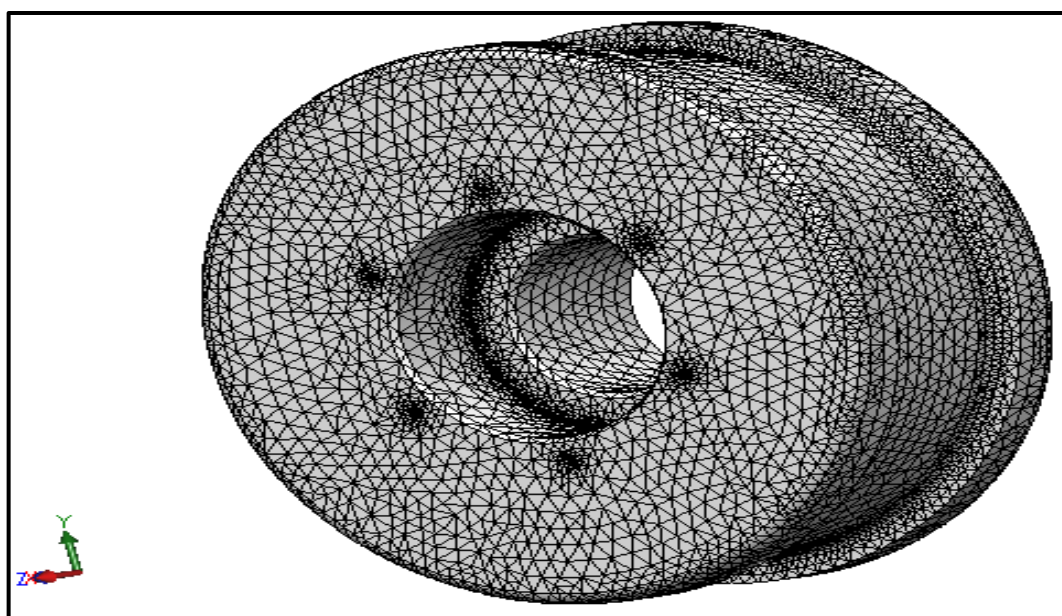


Figura 71 - Malha de elementos finitos da roda de pintura.

Nas figuras 72 a 75 ilustram-se a distribuição das tensões de von Mises e dos deslocamentos equivalentes na roda de pintura. Tal como se pode observar, a tensão máxima

tem o valor máximo de 253.1 MPa, inferior à tensão de cedência do material, e com um coeficiente de segurança de 3.6.

O deslocamento equivalente máximo tem o valor de 0.041 mm. Perante os resultados obtidos, pode-se afirmar que a roda se encontra bem dimensionada.

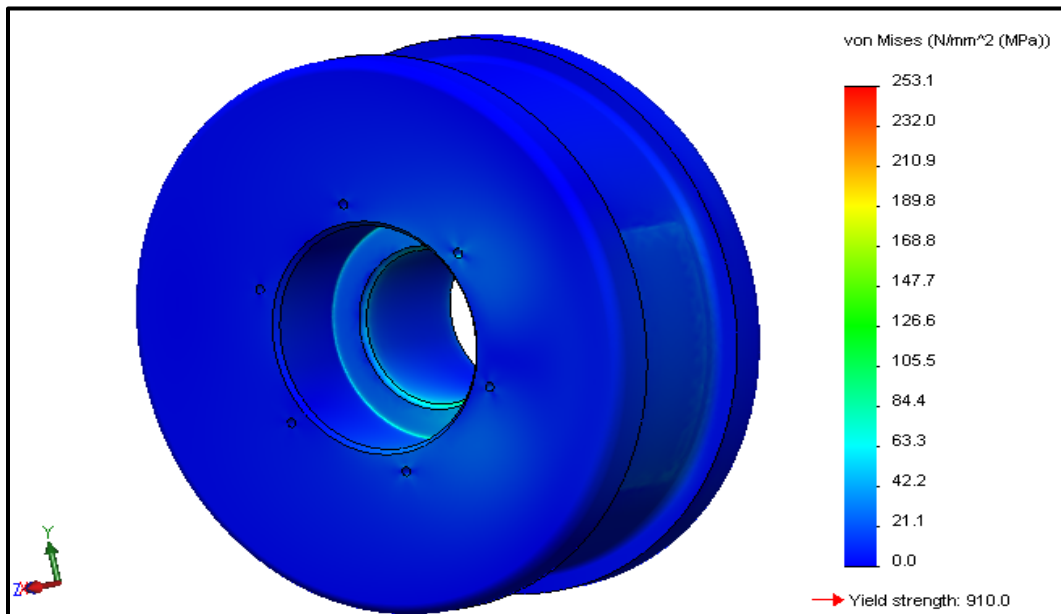


Figura 72 - Distribuição das tensões de von Mises.

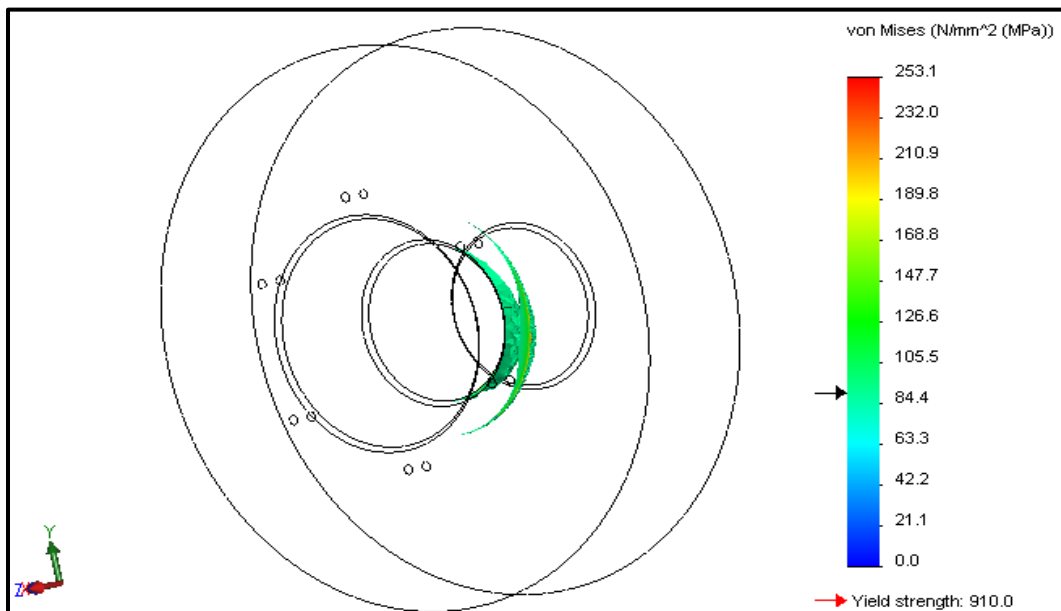


Figura 73 - Isovalores da distribuição das tensões de von Mises - 90 MPa.

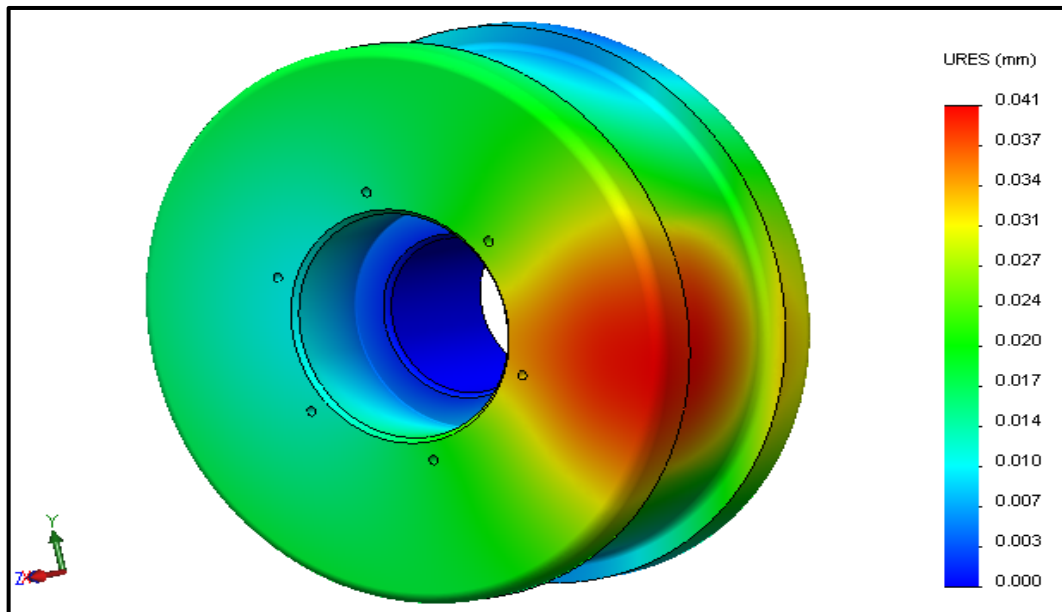


Figura 74 - Distribuição dos deslocamentos equivalentes.

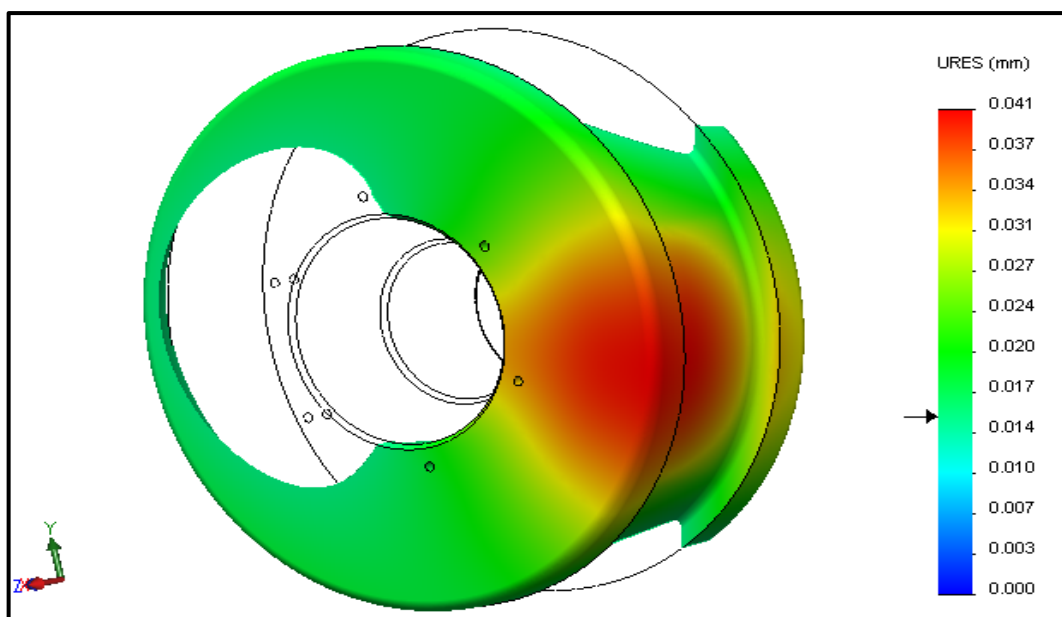


Figura 75 - Isovalores da distribuição dos deslocamentos equivalentes - 0.015 mm.

5.2.3. Estimativa de custos

No seguimento do projeto e dimensionamento dos elementos estruturais do carro, procedeu-se à elaboração do caderno de encargos e fabrico. O caderno de encargos contabiliza todo o material e mão-de-obra necessária para a fabricação do carro de movimentação. As tabelas 6 e 7 representam de modo sucinto a tabela resumo do caderno de

encargos para o carro motriz e o carro livre respectivamente. Esta tabela é a utilizada na empresa Engebasa.

Tabela 6 - Caderno de encargos resumido do carro motriz.





		ESTIMATIVA DE CUSTOS			ORÇAMENTO Nº:						
CLIENTE		ITEM	CÓDIGO		QTE	UNID	Nº DA S.C				
ENGBASA		1.1	CJPTM 2013		1	CJ					
LOCAL:		CUB	DATA:	01-03-2013	HORA:		DESENHO	ENGBASA			
CARRO DE MOVIMENTAÇÃO MOTRIZ							DESENVOLVIMENTO				
PLANILHA DE MÃO DE OBRA E MATERIAL							REVISÃO	ZERO	05-12-2012	FOLHA	
CUSTOS SERRALHARIA					CUSTOS MAQUINAGEM						
OPERAÇÃO		HORAS	R\$ UNIT.	R\$ TOTAL	OPERAÇÃO		HORAS	R\$ UNIT.	R\$ TOTAL		
TRAÇ.		2,50	75,00	187,50	MTP		GI	30,00	80,00	2.400,00	
OXI-CORTE CNC		3,50	187,00	654,50			GII	15,00	101,00	1.515,00	
CORTE A FRIO		3,00	175,00	525,00	MTP CNC		GI				
CHANFRO							GII				
DOBRA					MTV		GI				
CALANDRA							GII				
PRE-MONTAR					MPM		GI				
MONTAGEM		26,00	75,00	1.950,00			GII				
SOLDA		SM			MMH		GI				
		SSA	12,00	75,00			900,00	GII			
		SSO				MMH CNC		GI			
ACABAM.		2,50	75,00	187,50	GII						
INSPEÇÃO		1,00	75,00	75,00	MFU		GI	3,00	80,00	240,00	
TESTE		LP					GII	6,00	115,00	690,00	
		US									
		DU									
PINTURA					MPL/MPV						
TRAT. TÉRM.					MFR		4,00	80,00	320,00		
					TRÇ.		2,00	75,00	150,00		
					AJUST.		8,00	75,00	600,00		
CUSTO TOTAL SERRALHARIA			4.479,50			TESTE		LP			
OBSERVAÇÕES			US								
			DU								
			PERITAGEM								
			LIMPEZA								
			INSPEÇÃO								
			ELETRICA		10,00	75,00	750,00				
			MONTAGEM		20,00	75,00	1.500,00				
			SOLDA		SM						
					SSA						
					SSO						
			TRAT. TÉRM.								
			C. MATERIAL			82.947,60	PESO	1.815,26	CUSTO MAQUINAGEM		8.165,00
TOTAL CUSTOS							R\$		95.592,10		
CONDIÇÕES DE VENDA					VALOR CALCULADO		VALOR REVISADO				
CL. FISCAL			R\$ VENDA LIQUIDO				R\$				
IPI		EX.		R\$ VENDA C/ IMPOSTOS				R\$			
ICMS		IN.	12%	PRAZO ENTREGA		DIAS		DIAS			
PIS/COFINS		IN.	0,9075%	COND. PAGAMENTO		DDL		DDL			
ACABAMENTO		CONFORME ESPECIFICAÇÃO									
LOCAL DE ENTREGA			FCA - TRANSPORTADORA			EXW		CIP			
ELABORADO POR:			GILBERTO			DATA		01-03-2013			
REVISADO POR:						DATA					

Tabela 7 - Caderno de encargos resumido do carro livre.

		ESTIMATIVA DE CUSTOS				ORÇAMENTO Nº:					
CLIENTE		ITEM		CÓDIGO		QTE		UNID		Nº DA S.C	
ENGE BASA		1.1		CJPTM 2013		1		CJ			
LOCAL:		CUB		DATA: 01-03-2013		HORA:		DESENHO		ENGE BASA	
CARRO DE MOVIMENTAÇÃO LIVRE								DESENVOLVIMENTO			
PLANILHA DE MÃO DE OBRA E MATERIAL								REVISÃO ZERO		05-12-2012 FOLHA	
CUSTOS SERRALHARIA						CUSTOS MAQUINAGEM					
OPERAÇÃO		HORAS	R\$ UNIT.	R\$ TOTAL		OPERAÇÃO		HORAS	R\$ UNIT.	R\$ TOTAL	
TRAÇ.		2,50	75,00	187,50		MTP		GI	30,00	80,00	2.400,00
OXI-CORTE CNC		3,50	187,00	654,50				GII	15,00	101,00	1.515,00
CORTE A FRIO		3,00	175,00	525,00		MTP		GI			
CHANFRO						CNC		GII			
DOBRA						MTV		GI			
CALANDRA								GII			
PRE-MONTAR						MPM		GI			
MONTAGEM		26,00	75,00	1.950,00		MMH		GI			
SOLDA		SM						GII			
		SSA	12,00	75,00	900,00						
		SSO									
ACABAM.		2,50	75,00	187,50		MMH		GI			
INSPEÇÃO		1,00	75,00	75,00		CNC		GII			
TESTE		LP				MFU		GI	3,00	80,00	240,00
		US				MPL/MPV		GII	6,00	115,00	690,00
		DU									
PINTURA						MFR			4,00	80,00	320,00
TRAT. TÉRM.						TRÇ.			2,00	75,00	150,00
						AJUST.			8,00	75,00	600,00
CUSTO TOTAL SERRALHARIA			4.479,50			TESTE		LP			
OBSERVAÇÕES			US								
			DU								
			PERITAGEM								
			LIMPEZA								
			INSPEÇÃO								
			ELETRICA								
			MONTAGEM		10,00	75,00	750,00				
			SOLDA		SM						
					SSA						
					SSO						
TRAT. TÉRM.											
RENDIMENTO H/H		HH	HM	HH+HM	KG/HH+HM						
		50,5	78,0	128,5	0,78						
PESO PROJETO		100		R\$/kg							
C. MATERIAL		38.405,49		PESO		1.815,26		CUSTO MAQUINAGEM		6.665,00	
TOTAL CUSTOS										R\$ 49.549,99	
CONDIÇÕES DE VENDA						VALOR CALCULADO		VALOR REVISADO			
CL. FISCAL				R\$ VENDA LIQUIDO				R\$			
IPI		EX.		R\$ VENDA C/ IMPOSTOS				R\$			
ICMS		IN.	12%	PRAZO ENTREGA		DIAS		DIAS			
PIS/COFINS		IN.	0,9075%	COND. PAGAMENTO		DDL		DDL			
ACABAMENTO		CONFORME ESPECIFICAÇÃO									
LOCAL DE ENTREGA		FCA - TRANSPORTADORA				EXW		CIP			
ELABORADO POR:		GILBERTO				DATA		01-03-2013			
REVISADO POR:						DATA					

A tabela 8 resume os custos parcelares e total dos carros de movimentação.

Tabela 8 - Custo total do conjunto

Carros de movimentação			
	<i>Serviços [R\$]</i>	<i>Material [R\$]</i>	<i>Total [R\$]</i>
<i>Carro motriz</i>	12.644,00	82.947,60	95.592,10
	(4.240,66 €)	(27.649,20 €)	(31.863,86 €)
<i>Carro livre</i>	11.114,50	38.405,49	49.549,99
	(3.704,83 €)	(12.801,83 €)	(16.506,66 €)
<i>Total do conjunto</i>			145.111,59
			(48.370,53 €)

5.2.4. Planeamento da Execução do Carro

O planeamento da execução é a fase em que se passa da modelação 3D para um detalhamento em 2D. Este procedimento foi executado com recurso ao *software* Autocad versão 2012. O programa permite uma definição detalhada das várias peças para posterior fabricação. Este detalhamento contém todas as cotas dimensionais das peças, os diferentes tipos de acabamento que devem ser efetuados e ainda as características da soldadura a ser depositada. A figura 76 ilustra um exemplo de uma folha de detalhe da roda de decapagem para fabricação.

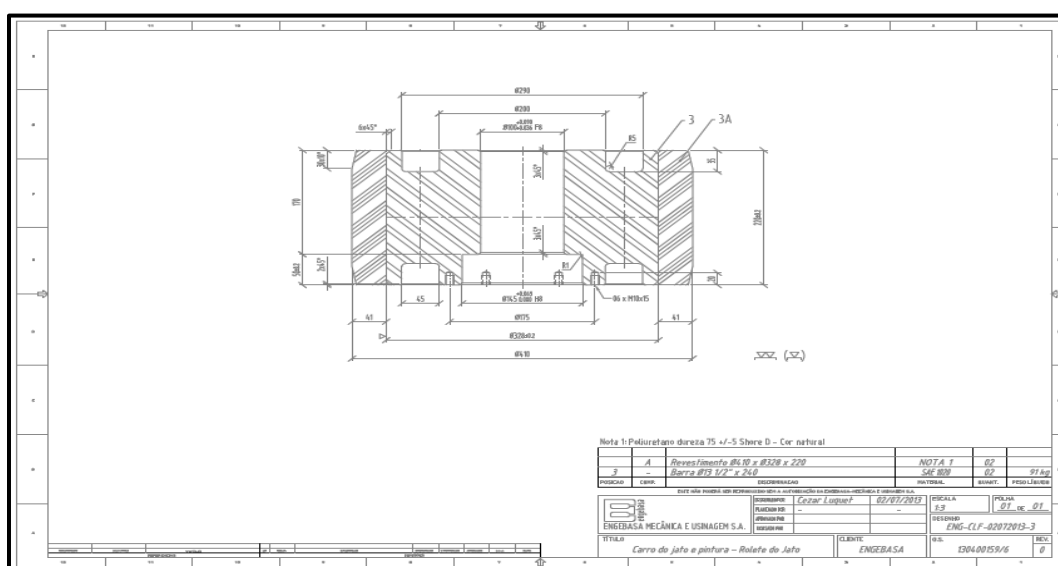


Figura 76 - Detalhamento da roda de decapagem.

O detalhe das peças é normalmente efetuado no setor de planeamento, que é também responsável por efetuar um plano de operação para todas as peças antes de passarem para a fabricação. Os planos de operação contêm todas as informações necessárias para uma correta produção dos componentes. A figura 77 mostra o plano de operação da roda de decapagem do carro.

PRATIQUE SEGURANÇA - USE E.P.I.'s											
PLANO DE OPERAÇÃO											
OS 130400152-001	Cliente FINGERASA ME	Título CARRO JATO E PINTURA - MOTRIZ				Código ENG000152-1	Data de Emissão 18/04/2013				
Complemento CARRO MOTRIZ - ROLETE DO JATO POS.3					Desenho ENG-CLF-12032013-3	Pedido ENG-001	Prazo Entrega 10/05/2013				
Norma Técnica SAE 1020	Quant. 2 un	Peso Unitário 91,00 Kg	Peso Total 182,00 Kg	Paralelador MARILIA ANTUNES		Rotulo Alternativo N/A	Data Fábri 17/04/2013				
Destino Montagem Final						OP 130400152-001/003					
Observação O material procede do setor de Almoarifado: Barra Ø13 1/2" x 240mm											
Oper.	Recurso	Descrição da Operação		Tempo Previsto		Data		Assinatura	Registro		
				Unit.	Total	Início	Fim				
10	SERRA_G1_CA	Serrar a barra, de acordo com indicações e medidas do croqui anexo.		0,75	1,50						
20	MTP_CNC_G2	Usinar o Ø328mm $\pm 0,2$ x 220mm $\pm 0,2$; deixando o diâmetro com acabamento grosso, para receber o revestimento. Usinar o Ø100 F8 $\pm 0,050$ $\pm 0,036$ passante executando o chanfro de 3mm x 45° e usinar o Ø145 F8 $\pm 0,0630$ x 50mm $\pm 0,2$ em concordância com o raio de 1mm e executando os chanfros de 3mm x 45°. Usinar em ambos os lados o alívio compreendido entre os diâmetros 290mm e 200mm x 35mm de profundidade em concordância com os raios de 5mm, e executando o chanfro de 2mm x 45°; de acordo com indicações e medidas do croqui anexo.		5,00	10,00						
30	TRAC_CALD	Traçar referências para usinagem de 6 furos Ø5mm (rosca M6); observando o ciclo de função de Ø175mm; conforme croqui anexo.		0,38	0,75						
40	MFR_CON_G1	Usinar 6 furos Ø5mm x 16mm de profundidade; de acordo com a traçagem e croqui anexo.		1,00	2,00						
50	AJUST_USI	Abrir as rosca M6 x 12mm e rebarbar.		0,63	1,25						
60	INSP_CALD	Inspeccionar visual e dimensional, identificar preparando para transporte.		0,25	0,50						
70	SERV_EXT_US	A roda segue para o serviço externo de revestimento de poliuretano na pista, objetivando uma dureza de 75 ± 5 Shore D.		120,00	240,00						
80	INSP_CALD	Inspeccionar visual e dimensional o serviço. Caso seja encontrada alguma anomalia, devolver a peça ao setor de Almoarifado.		0,25	0,50						
Análise crítica de um produto não conforme											
Operação	Análise do produto			Responsável	Data	Operação	Análise do produto			Responsável	Data
	A	B	C				A	B	C		
	A	B	C				A	B	C		
	A	B	C				A	B	C		
A - Retrabalho para atender os requisitos B - Produto aceito pelo cliente com concessão C - Produto rejeitado e/ou sucateado											
Observações devem ser escritas no verso da página											

Figura 77 - Plano de operação da roda de decapagem.

Uma outra função do planeamento passa por efetuar o relatório de aprovisionamento do material. Este relatório consiste no levamento de todo o material que terá de ser comprado para poder executar o serviço. O relatório é enviado para o setor de compras que fica

responsável pela aquisição de todos os materiais nos prazos que lhe for imposto no projeto. A figura 78 ilustra o provisionamento do projeto do carro de movimentação.

										Relatório de Aprovisionamento de Material											
OS 130400159-001		Cliente ENGEBASA MECANICA E USINAGEM LTDA.				Pedido ENG-001		Planejador MARILIA ANTUNES		Data Emissão 08/04/2013		Data Impressão 15/04/2013		Pag 1 de 2							
Código ENG001SUL-1		Item da OS CARRO JATO E PINTURA - MOTRIZ				Quantidade 1		Alternativa				Prazo 11/04/2013									
Cód. Item		Quant.		Un.		Área/Comp.		Valor Orçado		Descrição do Item				Observação							
00000142		58,5		kg		0,39		0,00		CHAPA 3/4" ASTM A36				Chaveta do Eixo de Acionamento, Chaveta do Redutor							
00000149		2		kg		0,01		0,00		CHAPA 3/4" SAE 1045											
00000176		10,3		kg		0,16		0,00		CHAPA 5/16" ASTM A36											
00000183		850		kg		6,82		0,00		CHAPA 5/8" ASTM A36											
00000230		2,5		kg		0,03		0,00		CHAPA 3/8" ASTM A36											
00000251		6,8		kg		0,18		0,00		CHAPA 3/16" ASTM A36											
00000275		141		kg		1,74		0,00		BARRA Ø 1 1/2" SAE 4140 NORM E BENEF. P/DUREZA 280-320HB				2 PQ'S Ø75mm - Eixo Motriz							
00000373		252		kg		0,30		0,00		BARRA Ø 1 1/2" SAE 4140 NORMALIZADA E BENEF. P/DUREZA 280-320HB				2 PQ'S 150mm - Rolete da Pintura							
00000374		350		kg		0,48		0,00		BARRA Ø 1 1/2" SAE 1020				2 PQ'S 240mm - Rolete do Jato							
00000505		4		un				0,00		ANEL DE FIXAÇÃO RPN 7012 Ø 100 x Ø 145 x 33 MM IMETEX				Rodas							
00160017		16		un				0,00		ARRUELA DE PRESSÃO Ø 14 DIN 127				Mancais							
00160027		8		un				0,00		ARRUELA DE PRESSÃO Ø 24 DIN 127											
00160043		24		un				0,00		ARRUELA DE PRESSÃO Ø 6 DIN 127				Tampas							
00200024		32		un				0,00		ARRUELA LISA Ø 16 DIN 125				Mancais							
00200039		16		un				0,00		ARRUELA LISA Ø 24 DIN 125											
00330456		8		un				0,00		PARAF CAB SEXT. ROSCA PARCIAL M24x100 DIN931 - CL 10.9 AÇO				Motoredutor							
00330747		16		un				0,00		PARAF CAB SEXT. ROSCA PARCIAL M16x80 DIN931 - CL 8.8 AÇO				Mancais							
00340129		24		un				0,00		PARAF ALLEN C/ CAB. M 6 X 16 MM R. TOTAL DIN 912 CL 8.8				Tampas							
00350005		4		un				0,00		PARAF ALLEN S/ CAB. M 10 x 25 MM DIN 913 CL 8.8				Acoplamento							
00460017		16		un				0,00		PORCA SEXT. M16 DIN934 - CL 8 AÇO				Mancais							
00490034		8		un				0,00		PORCA SEXT. M24 DIN934 - CL 10 AÇO											
00000011		2		un				0,00		MANCAL NSBP 16 GSSS LC COMPLETO (TAMPA, ROLAMENTO 22216K, BUCHA, PORCA E ANEL)				Eixo							
00000013		2		un				0,00		MANCAL NSBP 16 GSSS BP COMPLETO (ROLAMENTO 22216K, BUCHA, PORCA E ANEL)				Eixo							
01000007		2		un				0,00		ACOPLAMENTO ANTARES WRAP SW 280 KUK											
00000143		2		un				0,00		DISJUNTOR BIPOLAR 2A - STECH											
00000412		2		un				0,00		DISJUNTOR BIPOLAR 4A - STECH											
00000413		2		un				0,00		DISJUNTOR BIPOLAR 6A - STECH											
00000414		2		un				0,00		DISJUNTOR TRIFÁSICO 32A - STECH											
00000415		2		un				0,00		DISJUNTOR TRIFÁSICO 10A - STECH											
00000416		2		un				0,00		DISJUNTOR MOTOR SCHNEIDER GV2 - P10											
00000417		1		un				0,00		TRANSFORMADOR MONOFÁSICO ENTRADA 440VOLTS, SAÍDA 220 V (200WATS)											
00000418		50		m				0,00		CABO 1 x 1,0mm² - PRETO											
00000419		50		m				0,00		CABO 1 x 1,5mm² - PRETO											

Figura 78 - Relatório de provisionamento de material para o carro.

Compete ainda ao setor de planejamento elaborar relatórios técnicos de inspeção para poderem ser utilizados durante as inspeções dos materiais. A figura 79 ilustra um desses relatórios.

RELATÓRIO TÉCNICO DE INSPEÇÃO FINAL/PARCIAL			
N.º: _____			
OS: 130400159-1	CLIENTE: ENGEBASA	PEIDO:	N.F.: _____
DESCRIÇÃO DO MATERIAL: CARRO MOTRIZ DO JATO E PINTURA		REV: 1	QT: 1
DESENHO: ENG-CLF-12032013-001			
DIMENSIONAL		INSTRUMENTO	
		TIPO	PATRIMÔNIO
OBSERVAÇÕES:			
LIBERADO CONFORME DESENHO, REQUISITOS DO CLIENTE E NORMAS APLICADAS.			
CONCLUSÃO:	RESPONSÁVEL INSPEÇÃO:	GERENTE RESPONSÁVEL:	
APROVADO: <input type="checkbox"/>	REG: _____	REG: _____	
REPROVADO: <input type="checkbox"/>	DATA: ____/____/____	DATA: ____/____/____	

Figura 79 - Relatório de inspeção.

5.2.5. Fabricação

Finalizada a fase de planeamento, os carros seguem para a fase de fabricação. Relativamente ao carro de movimentação, documenta-se nesta seção o fabrico do protótipo do carro. O processo foi iniciado no setor de corte, recorrendo à mesa de oxi-corte. Após o corte da chapa as peças foram separadas e limpas manualmente, como ilustra as figura 80.

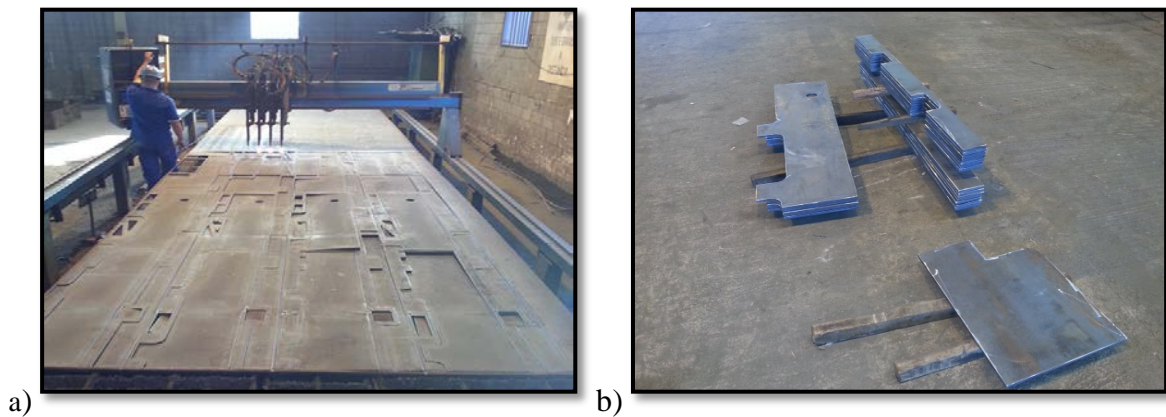


Figura 80 - a) Corte da chapa na mesa de oxi-corte; b) Peças cortadas e limpas.

Seguiu-se a execução dos chanfros nas zonas onde as peças iriam receber cordão de soldadura, de acordo com as especificações técnicas do projeto. No seguimento da chanfragem, as peças foram quinadas para aquisição da forma adequada. A figura 81 ilustra a chanfragem e mostra as peças já quinadas.

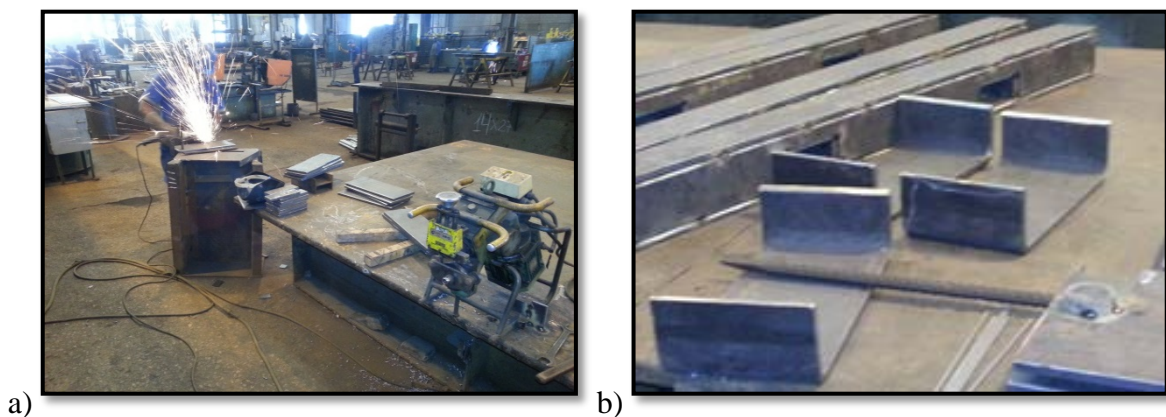


Figura 81 - a) Chanfre a ser efetuado nas peças; b) Peças já dobradas.

Seguiu-se a montagem posicional das vigas da estrutura, no setor de serralharia. Nesta fase apenas se pontearam as peças para posterior enchimento com cordão de solda (figura 82).

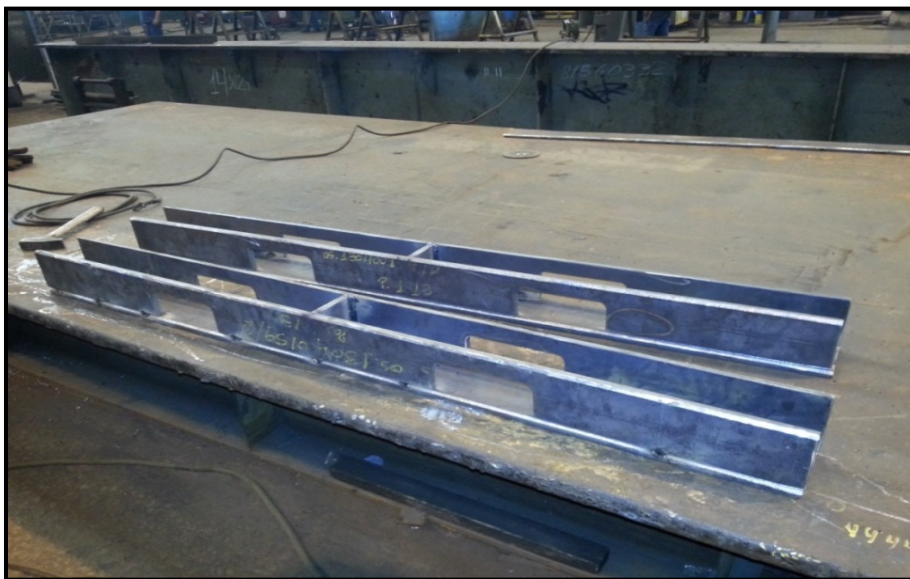


Figura 82 - Vigas ponteadas preparadas para enchimento de solda.

Concluído o enchimento de solda das vigas segue-se a montagem dos componentes da estrutura. A figura 83 mostra a estrutura já montada.



Figura 83 - Estrutura com os cordões de soldadura depositados.

➤ Inspeção por Líquidos Penetrantes

Após a montagem procedeu-se a uma inspeção a todos os cordões de soldadura, recorrendo ao líquido penetrante para se verificar a existência de imperfeições no cordão. A figura 84 ilustra o método de líquidos penetrantes, aplicados na estrutura.



Figura 84 - Estrutura em fase de inspeção por líquidos penetrantes.

Atendendo à importância do método de inspeção por líquidos penetrantes no contexto do projeto desenvolvido, apresenta-se aqui um resumo deste tipo de metodologia. O ensaio por líquidos penetrantes é um método não destrutivo, desenvolvido especialmente para a detecção de discontinuidades, essencialmente superficiais, e ainda que estejam abertas na superfície do material (Andreucci, 2008).

Este método foi iniciado antes da primeira guerra mundial, principalmente pela indústria ferroviária, e para inspeção dos veios das rodas. Contudo, esta técnica foi impulsionada em 1942 com desenvolvimento de líquidos penetrantes fluorescentes. Nesta época, o ensaio foi adotado pelas indústrias aeronáuticas, que trabalhando com ligas não ferrosas, necessitavam de um método de detecção de defeitos superficiais diferentes do ensaio por partículas magnéticas (não aplicável a materiais não magnéticos).

O ensaio por líquidos penetrantes permite detetar discontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como fissuras, poros, dobras, etc. Pode ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. Além dos materiais magnéticos, é também muito usado em materiais não magnéticos, tais como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio e zircônio. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos.

A metodologia consiste em fazer penetrar um líquido na abertura da descontinuidade. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, retira-se da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície.

No seguimento da inspeção efetuada, e tendo havido sucesso, as estruturas seguiram para um procedimento de decapagem e um tratamento superficial a base de fosfato de zinco para melhorar a resistência à corrosão de substratos metálicos. A figura 85 mostra as estruturas depois de terem passado por esse tratamento superficial.

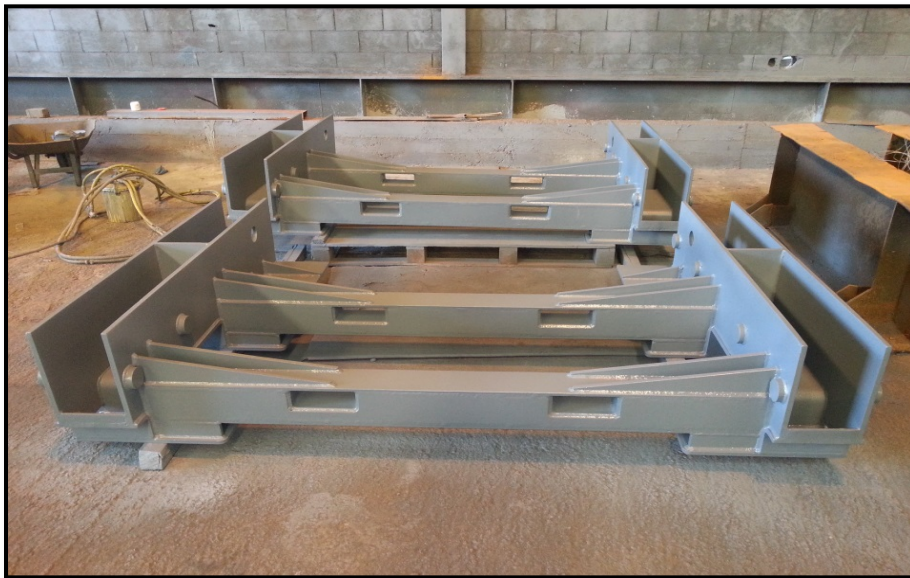


Figura 85 - Estruturas após o tratamento superficial.

➤ Alívio de Tensões por Vibração

No procedimento de fabrico foi depositada quantidade de material de ligação por processo de soldadura. Na soldadura, quando são gerados altos gradientes térmicos, o aparecimento de tensões é bastante acentuado, podendo levar a distorções dimensionais, resultantes da expansão e da contração não uniformes do metal da solda e do metal-base adjacente. Esta situação pode conduzir a problemas estruturais quando o material for solicitado mecânicamente. Deste modo, as estruturas são submetidas normalmente a um procedimento de alívio de tensões, geralmente por via térmica que consiste num conjunto de operações envolvendo aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e arrefecimento sob condições controladas (Ortega, 2003).

Para a eliminação deste problema, e em substituição ao alívio térmico de tensões, vem sendo utilizada há mais de 20 anos, em várias partes do mundo, uma tecnologia que utiliza a vibração mecânica, com resultados satisfatórios e comprovada economia de energia. Esta tecnologia, designada por *Alívio de Tensões por Vibrações Sub-Harmônicas*. O procedimento consiste em colocar numa mesa de apoio a estrutura onde se pretende efetuar alívio de tensões. Um motor elétrico, acoplado à mesa e com um veio onde está fixa uma massa excêntrica, permite induzir ao conjunto mesa-estrutura a gama de vibrações desejada para promover o alívio das tensões. O sistema tem uma unidade de controlo que inclui dois acelerómetros e um controlador da velocidade de rotação do veio.

Numa primeira etapa o sistema identifica as frequências de vibração correspondentes aos principais modos de vibração. Posteriormente, o sistema é colocado em funcionamento no patamar de frequências de vibração correspondentes ao início do primeiro modo de vibrar. O período de tempo de exposição varia com a experimentação. A figura 86 mostra a aplicação desta metodologia nas estruturas de suporte do carro.



Figura 86 - Estruturas de suporte em procedimento de alívio de tensões por vibração.

Apesar de esta metodologia ser pouco aceite no meio académico, não estando ainda incluída nas principais normas internacionais, os resultados práticos têm sido comprovados em diversas empresas, onde se inclui a Engebasa, que a utiliza em todas as estruturas que fabrica. Um Estudo sobre a teoria do alívio de tensões sub-ressonante foi publicado por Skinner (1987). Neste estudo, o autor mostra que quando se aplica a frequência de vibração

correspondente ao primeiro ou segundo modo de vibrar (ressonância na primeira e segunda harmônica), o resultado é praticamente nulo. Contudo, se for aplicada a frequência de vibração correspondente à região sub-harmônica, o alívio de tensões é verificado. Este tipo de tratamento de alívio de tensões, na maioria dos casos, não requer mudanças nas propriedades mecânicas, nas dimensões ou na estrutura cristalina dos metais, mostrando-se uma técnica eficaz, comprovada experimentalmente (Martins, Morilla, Marques, & Delijaicov, 2012). Em geral as tensões internas dos materiais são removidas sem afetar as suas características físico-químicas, como ocorre nos tratamentos térmicos convencionais.

Com o processo de alívio de tensões efetuado, a estrutura seguiu para o setor de maquinagem. As zonas de acoplamento do redutor e das chumaceiras foram maquinadas para garantir o alinhamento e paralelismo exigidos. Procedeu-se também à furação para a fixação dos blocos de rodas. A figura 87 ilustra a estrutura em processo de maquinagem.



Figura 87 - Estrutura em fase de maquinagem.

No seguimento da maquinação efetuada, iniciou-se o processo de montagem dos blocos de rodas nas estruturas e o sequente processo de pintura do conjunto.

Na figura 88 podem ser vistas as rodas a ser montadas na estrutura e o conjunto após pintura.

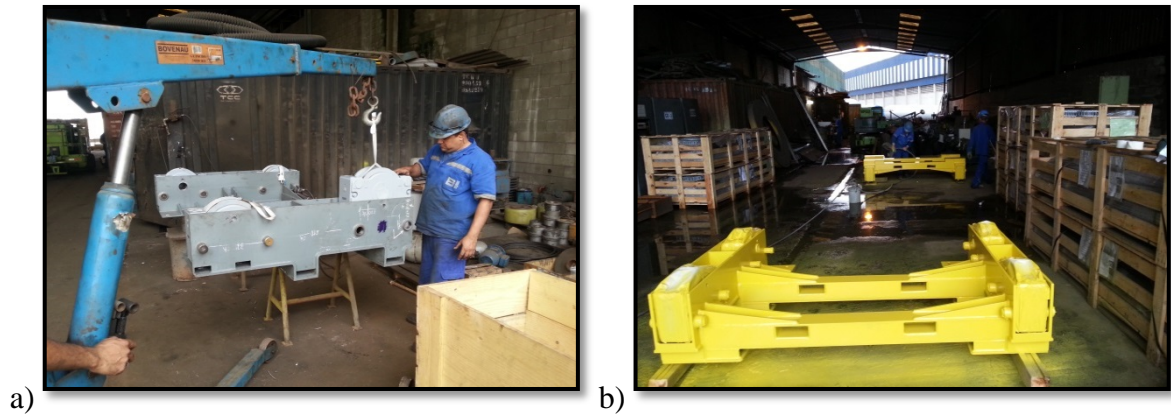


Figura 88 - a) Blocos de rodas a serem aplicados na estrutura; b) Conjunto pintado.

Terminada a produção da estrutura, procedeu-se à maquinação dos veios, de acordo com as condições e geometria do projeto. (figura 89) Atendendo à importância estrutural dos veios no carro de movimentação, e de modo a garantir a inexistência de imperfeições que possam condicionar o seu correto desempenho, procedeu-se a minuciosa inspeção com a técnica de ultra-sons.

Esta metodologia de ensaio não destrutivo tem por objetivo a deteção de defeitos ou discontinuidades internas, que possam estar presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Em geral, estes defeitos aparecem no processo de fabricação do componente estrutural, podendo citar-se como exemplos as bolhas de gás em material fundido, a dupla laminação em laminados, as micro-fissuras em forjados, as escorias em uniões soldadas, entre outros.

O ensaio por ultra-sons, assim como outro tipo de ensaio não destrutivo, visam diminuir o grau de incerteza na utilização de componentes estruturais com relevante importância no domínio da sua aplicação.

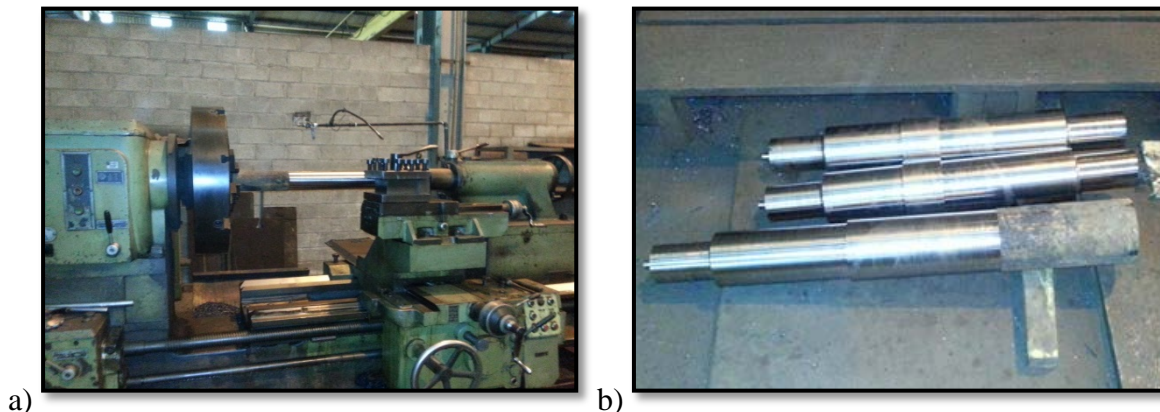


Figura 89 - a) Veio a ser maquinado; b) Veios após maquinação.

➤ Método de ensaio por ultra-sons

Em 1929 um cientista de nome Sokolov (Krautkramer, 2010), fazia as primeiras aplicações para detetar a passagens do sons através de materiais metálicos. Em 1942 Firestone, utilizaria o princípio da ecosonda ou ecobatímetro, para exames de materiais (Krautkramer, 2010). Somente em 1945 o ensaio ultra-sônico iniciou sua caminhada em aplicações industriais, impulsionado pelas necessidades e responsabilidades cada vez maiores.

Hoje, na moderna indústria, principalmente nas áreas de serralharia e estruturas marítimas, o ensaio não destrutivo por ultra-sons constitui uma ferramenta indispensável para a garantia da qualidade de componentes estruturais, em particular elemento de elevada complexidade e com ligação por soldadura. Na maioria dos casos, os ensaios são aplicados em aços com teor de carbono e em menor percentagem em aços inoxidáveis, já que os materiais não ferrosos são difíceis de serem examinados, e requerem procedimentos especiais.

O método de inspeção por ultra-sons baseia-se na interpretação da reflexão de um som que é emitido e direcionado para determinada zona do componente a inspecionar. Repare-se que num passado, diversos testes mecânicos, por exemplo a veios ferroviários, sinos, entre outros, eram executados através de testes com martelo, em que o som produzido pela peça, denunciava a presença de fissuras grosseiras pelo som que emitia.

No caso dos ultra-sons, caracterizados por emissões acima de 20 kHz, a sua percepção pelo ouvido humano é impossível. Assim, é o próprio equipamento que emite a onda sonora, deteta a reflexão que é recebida do interior da zona em análise, localizando e interpretando as

descontinuidades existentes, que tenham alterado a reflexão prevista. A figura 90 ilustra o método de inspeção por ultra-sons.

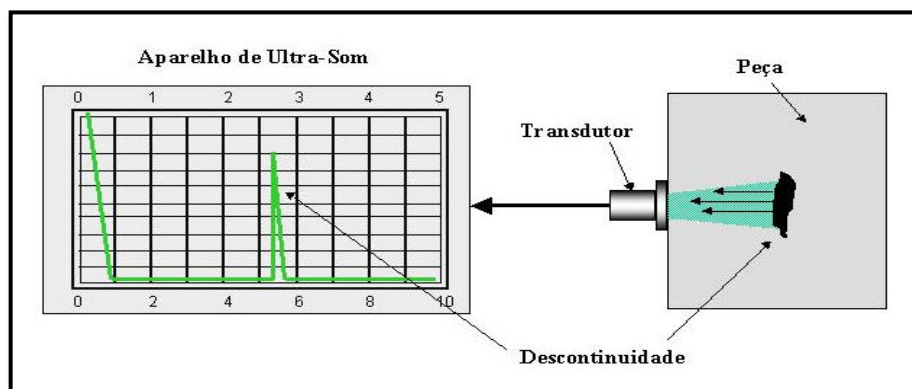


Figura 90 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultra-sons.

Assim como qualquer ensaio não-destrutivo, a metodologia de teste por ultra-sons tem vantagens e limitações nas suas aplicações. A principal vantagem está relacionada com a sua alta sensibilidade na detetabilidade de pequenas descontinuidades internas, como por exemplo fissuras provenientes de tratamentos térmicos, fissuras entre outros de difícil detecção por ensaios de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia), (Andreucci, 2006). A metodologia de inspeção é agilizada pelo processo de interpretação das indicações, dispensando processos intermediários, tais com a necessidade de revelação do filme no caso da radiografia. Além disso, ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o teste por ultra-sons não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação. Também a objetividade e possibilidade de quantificação são características importantes associadas ao método. Repare-se que por exemplo um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho mas não a sua profundidade e em muitos casos este é um fator determinante para procedimento de reparação.

Contudo, a aplicação desta metodologia requer um forte conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor. Também a superfície do componente em análise terá de ser preparada, o que nem sempre é fácil, com por exemplo em alguns casos de inspeção de soldadura, em que existe a necessidade da remoção total do reforço da solda. Também as faixas de espessura muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método.

Concluída a execução dos veios, seguiu-se a maquinação e preparação das rodas de decapagem. Tendo como base um varão maciço de diâmetro 340 mm, o procedimento consistiu em maquinar o diâmetro externo, seguido da furação interna e a maquinação das ranhuras da roda, tal como se mostra na figura 91.

Após a maquinação das rodas, foi depositado um revestimento de poliuretano (este procedimento foi efetuado numa unidade industrial externa à Engebasa).

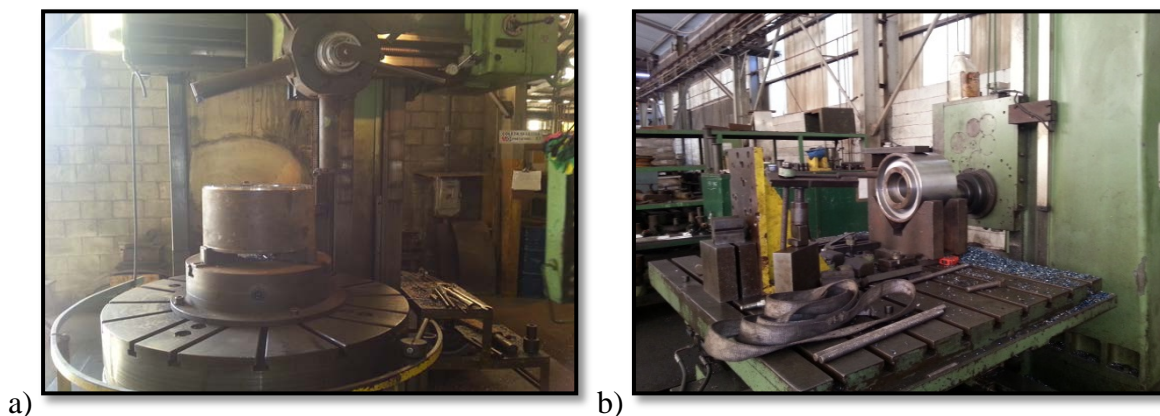


Figura 91 - Maquinação da roda de decapagem: a) Diâmetro externo; b) Ranhuras.

As rodas de pintura seguiram o mesmo procedimento de produção das rodas de decapagem. Na figura 92 podem-se visualizar estas rodas em processo de maquinação.

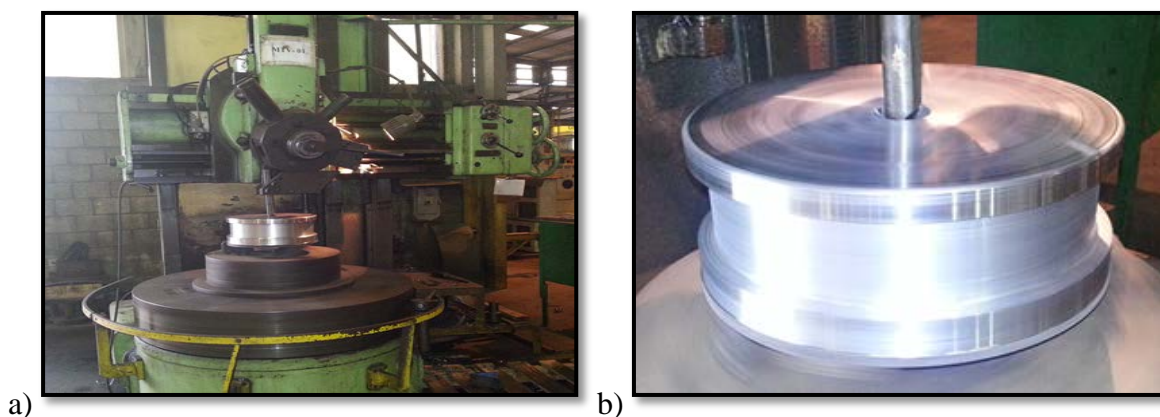


Figura 92 - Roda de pintura: a) Em maquinação; b) Após maquinação.

Terminado o fabrico de todos os componentes do carro, iniciou-se o procedimento de montagem do conjunto, começando-se por instalar o sistema de movimentação (figura 93).

Paralelamente foram acopladas aos veios as rodas de decapagem e de pintura (figura 93).

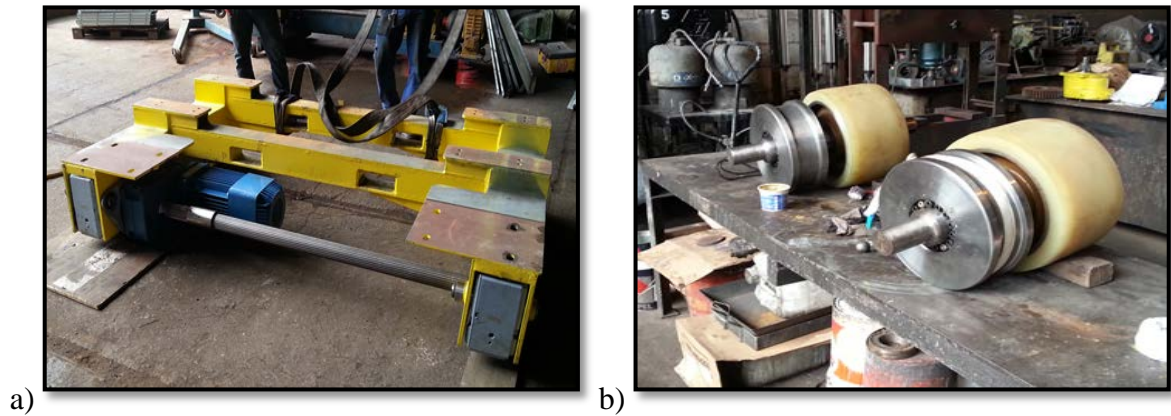


Figura 93 - a) Redutor aplicado na estrutura; b) Rodas montadas nos veios.

Concluída a montagem dos veios de transmissão, procedeu-se à sua colocação nas estruturas através das chumaceiras. Posteriormente foram montados os redutores. A figura 94 mostra estes equipamentos já instalados.

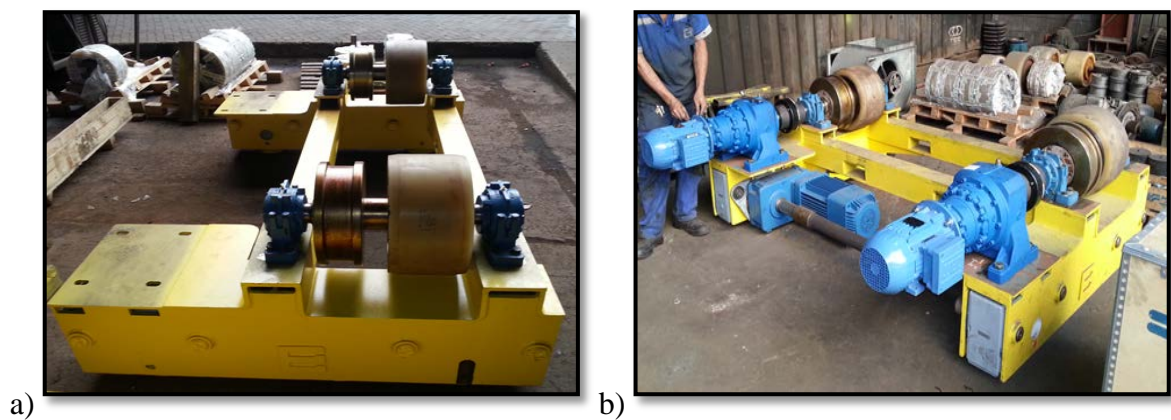


Figura 94 - a) Carro livre finalizado; b) Carro motriz finalizado.

Terminada a montagem de todos os componentes estruturais dos carros, procedeu-se à colocação do sistema elétrico e de controlo, tanto de movimentação como de rotação (figura 95).

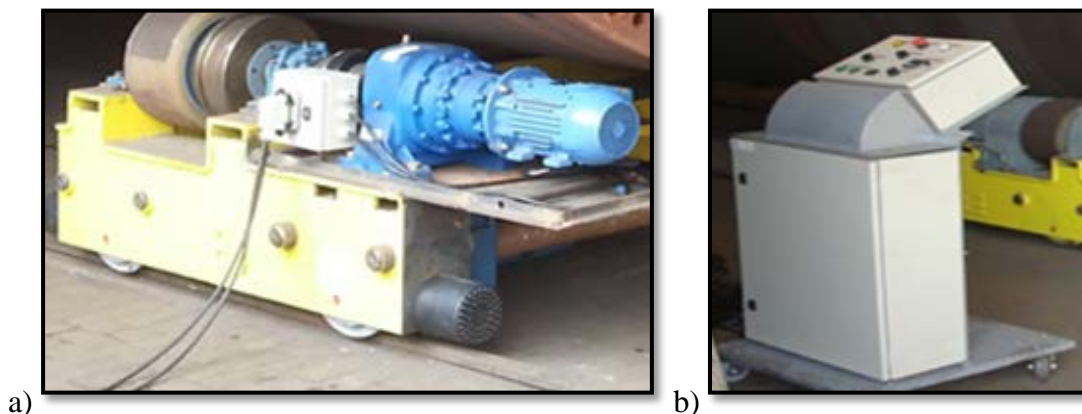


Figura 95 - a) Carro motriz com a parte elétrica instalada; b) Painei de controlo.

O painel de controlo incorpora um conjunto de comandos que inclui, além duma chave seletora de acionamento de movimento e rotação, um sinalizador de avaria, um botão de emergência e um botão de sistema acionado.

O painel inclui também um mostrador da velocidade e sentido de rotação, assim como um potenciômetro de regulação. Para se poder regular a velocidade e ainda o sentido do giro (figura 96). Importa explicitar que, apesar do sistema de controlo não ter sido projetado pelo estagiário, este acompanhou todo o processo que conduziu à sua implementação nos carros desenvolvido, tendo sido responsável pelo *layout* do painel.



Figura 96 - Visualização do painel de comando.

5.2.6 Testes Finais

Concluída a montagem dos carros, iniciou-se a fase de testes. Colocados os carros nos trilhos de movimentação, foi-lhes colocado um troço de uma torre com cerca de 60 toneladas, tal como mostra a figura 97.

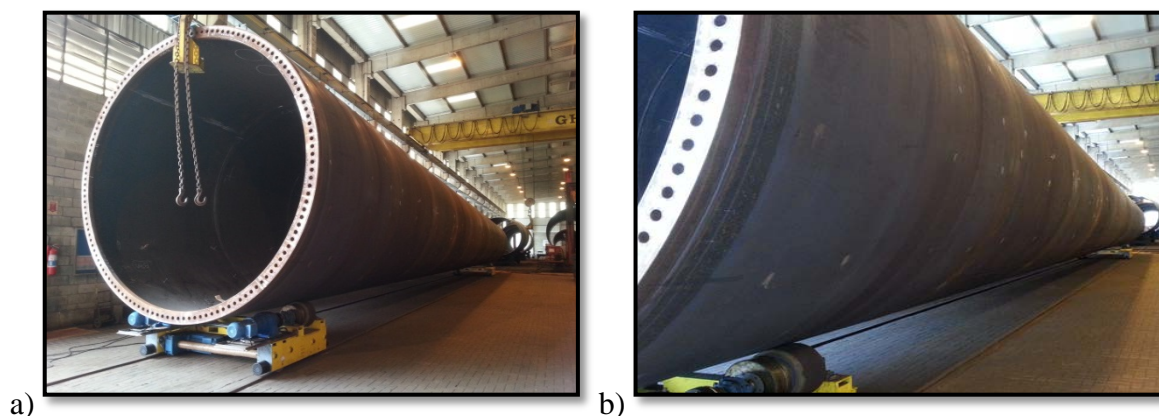


Figura 97 - a) Troço de 60 toneladas sobre os carros; b) Teste ao sistema de movimentação.

Inicialmente foi testado o sistema de movimentação, executando-se várias movimentações no trilho para se poder observar o comportamento dos carros. De seguida foi testado o sistema de rotação, fazendo rodar o troço e alternado a sua velocidade de rotação, desde o valor mínimo ao máximo. A figura 98 mostra os testes aos sistemas de movimentação e de rotação. Os carros ultrapassaram todos os testes realizados, tendo sido aprovados para colocação em funcionamento.

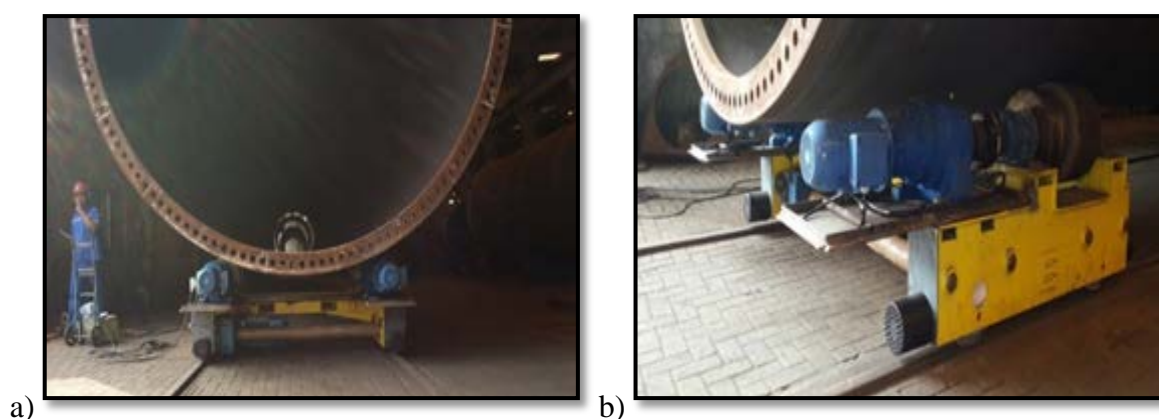


Figura 98 - Teste ao sistema de rotação.

Finalizados todos os testes aos carros de movimentação pode-mos concluir que estes superarão todas as expectativas, vendo assim o meu trabalho recompensado e o objetivo proposto pela empresa para o meu estágio ter sido realizado com sucesso.

5.3. Simulação de Trabalho

Nesta secção descreve-se a simulação de trabalho do carro de movimentação. Este equipamento acompanha os troços desde a área de acabamentos até à área de montagem de internos. A figura 99 ilustra a perspectiva da área de trabalho, assim como o conjunto troço - carros de movimentação.

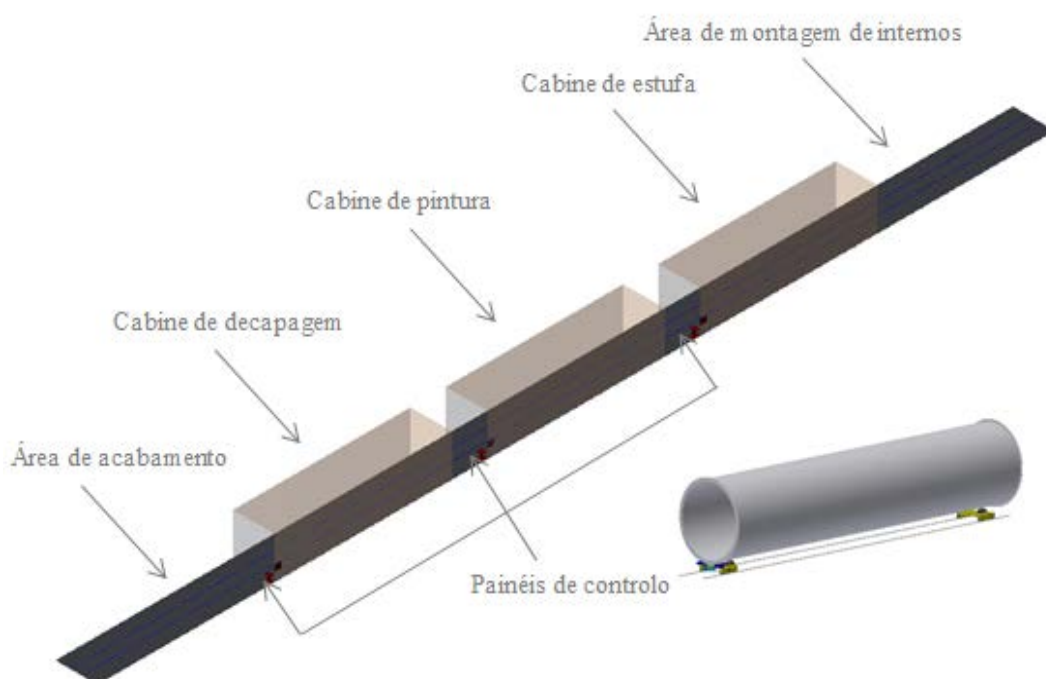


Figura 99 - Perspetiva da área de trabalho dos carros de movimentação.

É na área de acabamento que o troço é colocado em cima dos carros de movimentação, recorrendo a uma ponte rolante. Os carros irão inicialmente fazer a movimentação do troço até a cabine de decapagem, percorrendo cerca de 30 metros. O troço permanecerá aproximadamente 8 horas dentro da cabine de decapagem até completar o processo de decapagem do mesmo. O carro executará a rotação do troço para que processo seja contínuo.

A figura 100 ilustra o troço dentro da cabine de decapagem, com o mesmo apoiado nas rodas de decapagem.

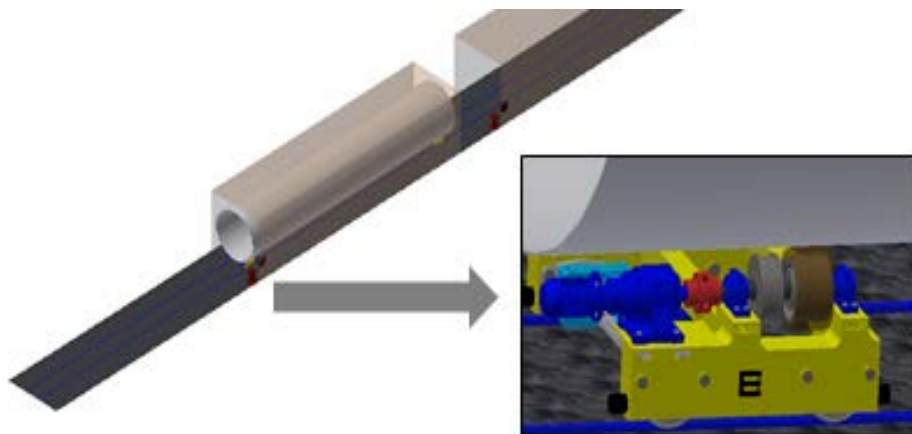


Figura 100 - Troço dentro da cabine de decapagem.

No seguimento do processo de decapagem, o carro fará a movimentação do troço para a cabine de pintura. É nesta fase que se instalam os acessórios para a pintura do troço, e que, através da ponte rolante se levanta o troço para a sua colocação sobre as rodas da pintura.

O troço permanecerá cerca de 6 horas dentro da cabine de pintura ate o processo estar completo. A figura 101 ilustra o troço na cabine de pintura apoiado sobre as rodas da pintura.

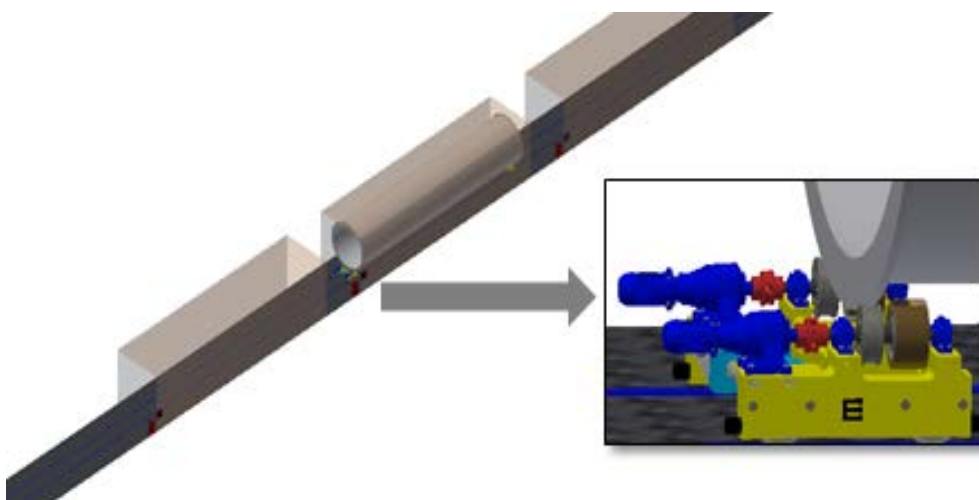


Figura 101 - Troço dentro da cabine de pintura.

Terminado o processo de pintura, o carro irá movimentar o troço para uma estufa onde permanecerá cerca de 2 horas a fim de terminar o processo de cura da tinta. Posteriormente, o troço é movimentado para a área de montagem de internos, sendo retirado dos carros de movimentação e colocado em viradores para se facilitar a montagem dos elementos internos.

Prevê-se que na nova unidade industrial os carros de movimentação executem este

circuito de trabalho com uma produção de dois a quatro troços diários. A unidade fabril tem duas linhas de produção.

5.4. Identificação de Melhorias

Apesar de os carros de movimentação (unidade motriz e livre) terem sido aprovados para colocação em funcionamento, dos testes efetuados foram identificadas algumas melhorias que se podem introduzir sem alterar consideravelmente o custo final do produto.

Estas melhorias, que se identificam sucintamente nesta secção, serão tidas em consideração na construção dos próximos 4 carros a produzir para utilização na nova unidade de produção de torres eólicas.

As melhorias identificadas são ao nível da componente estrutural, em particular com a troca de alguns materiais, assim como nas chumaceiras, no sistema de movimentação, e no diâmetro dos veios de transmissão. Estas alterações estão identificadas na figura 102.

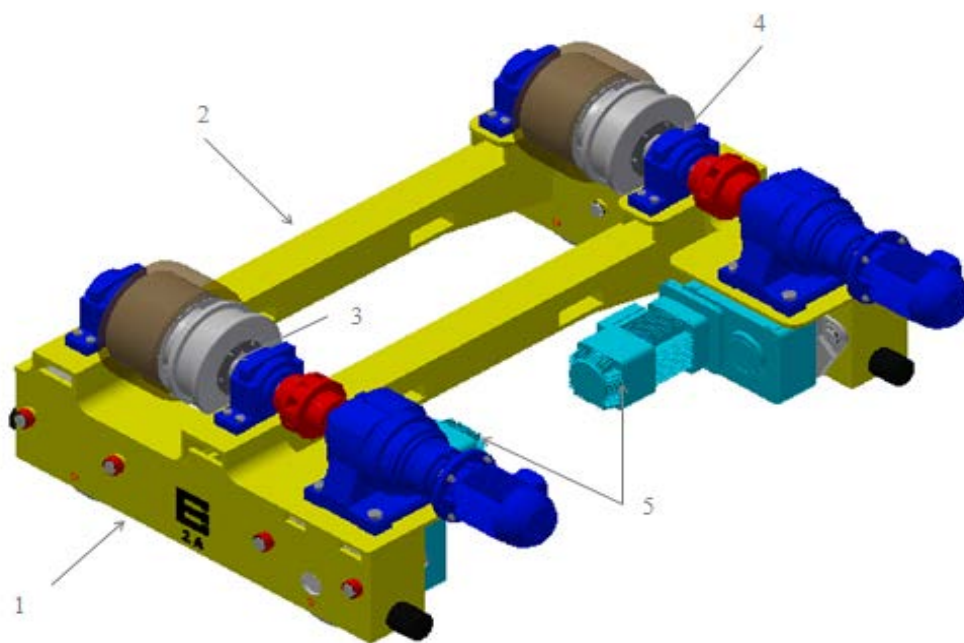


Figura 102 - Identificação dos pontos de melhoria no carro de movimentação.

O *item 1* identificado na figura 102 refere-se a uma alteração na espessura das chapas laterais, que passam dos 15.9 mm para os 19 mm, aumentando assim a resistência e rigidez desta estrutura. Esta alteração tem como justificação o facto de ser nessas chapas laterais que se encontra a maior concentração de tensões.

O *item 2* refere-se às vigas da estrutura, também redimensionadas de 130x150 mm para 150x150 mm e aumentando também a espessura da chapa de 15.9 mm para 19 mm. Esta alteração teve como objetivo aumentar a rigidez da viga.

O *item 3* refere-se ao veio de transmissão, redimensionado em relação ao seu diâmetro inferior, de acoplamento às chumaceiras, passando de 70 mm de diâmetro para os 80 mm, permitindo assim haver um maior aproveitamento do material visto que o material base é um varão maciço de 125 mm diâmetro, reduzindo assim o tempo de maquinagem e ganhando-se assim uma maior robustez do veio.

O *item 4* refere-se ao ajuste das chumaceiras, adaptadas ao novo diâmetro do veio de transmissão. Finalmente, o *item 5* refere-se ao sistema de movimentação. Optou-se por alterar o sistema de acionamento, que passa a ser feito por dois motores em vez de um.

Trata-se de uma alteração relevante ao nível do custo final, mas que garante maior fiabilidade do equipamento, já que retira o recurso a um *cardan*, que poderia entrar em rotura devido às irregularidades do trilho de movimentação.

6. OUTRAS MELHORIAS IMPLEMENTADAS

Tal com exposto atrás, apesar de se considerar o desenvolvimento do carro de movimentação dos troços das torres eólicas no seu processo produtivo como o trabalho mais ambicioso e com destaque, no decorrer no estágio foram identificadas e implementadas diversas soluções conducentes também à melhoria do processo produtivo das torres na Engebasa. Assim, neste capítulo descrevem-se de forma sucinta algumas soluções desenvolvidas e implementadas, que conduziram à melhoria do processo produtivo.

6.1. Dispositivo Mecânico para Apoio na Instalação da Armação da Porta de Vigia

Este projeto de melhoria tem o seu enquadramento ao nível da instalação da armação da porta de vigia para entrada na torre eólica.

A principal dificuldade neste procedimento tinha a ver com a geometria da armação da porta e a sua elevada massa global, o que implicava o recurso a muita mão-de-obra para poder auxiliar na montagem da mesma, tornando o processo caro e demorado. Este processo era anteriormente executado recorrendo a uma empilhadora e aos seus garfos frontais, o que limitava os graus de movimentação da armação da porta para poder ser ajustada e aplicada no troço. Assim, foi desenvolvido um dispositivo de apoio à montagem, para ser fixo na armação da porta e posteriormente encaixado nos garfos da empilhadora com recurso a um varão, permitindo desta forma aumentar a capacidade de ajuste da armação da porta. A figura 103 mostra o modelo 3D do dispositivo fixo à armação, o processo de montagem desenvolvido, assim como um detalhe do dispositivo.

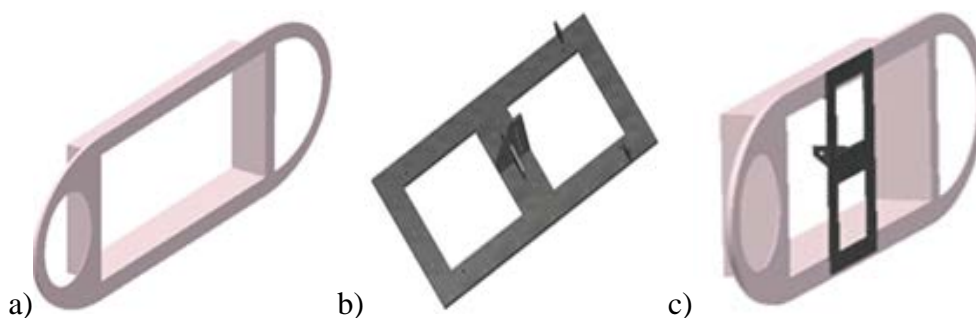
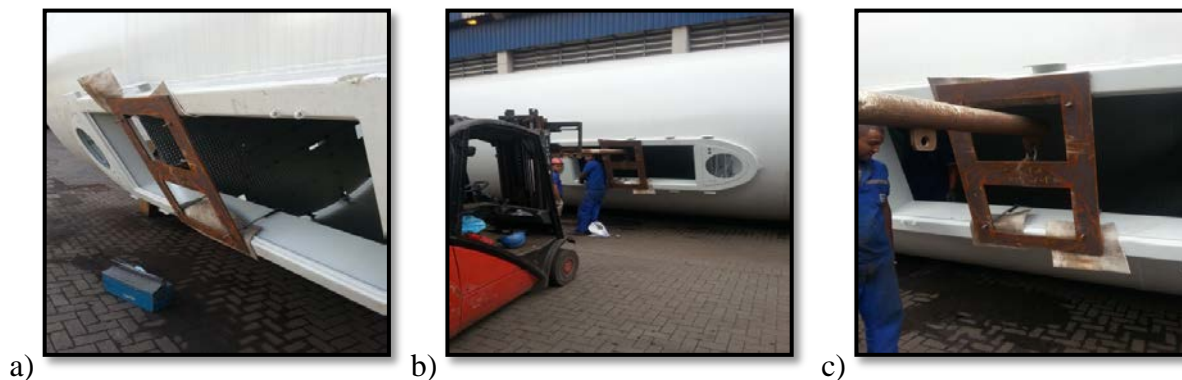


Figura 103 - a) Armação da porta; b) Dispositivo desenvolvido; c) Simulação de trabalho.

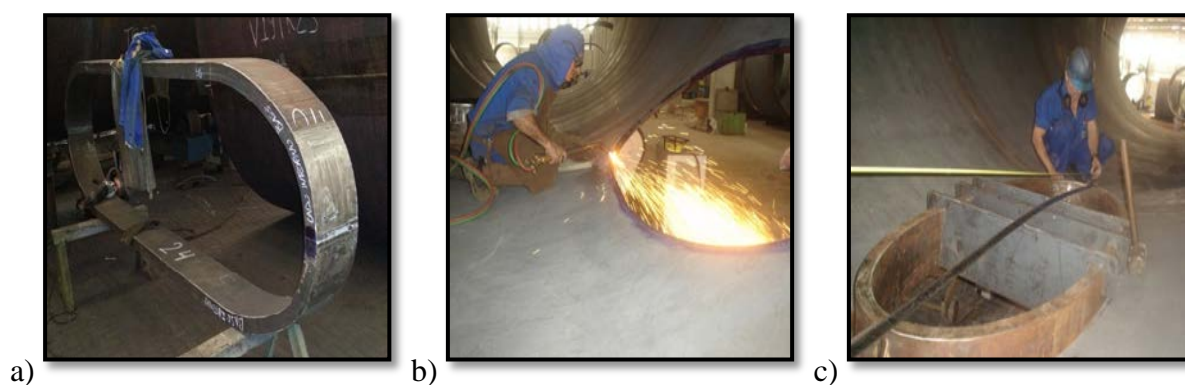
A figura 104 ilustra a armação da porta e o dispositivo desenvolvido e procedimento para instalação da porta.



A implementação desta melhoria permite fixar a armação com uma redução de tempo de aproximadamente duas horas relativamente ao procedimento anterior, assim como reduzir de 5 para 3 o número de colaboradores necessários para a realização desta operação.

6.2. Gabarito de Apoio

Uma outra melhoria consistiu no desenvolvimento de um gabarito para auxílio na traçagem do batente da porta na fase de corte da virola para aplicação do batente. Este procedimento era executado do seguinte modo: o batente teria de ser movimentado para dentro das virolas recorrendo a uma ponte rolante. Após a execução da traçagem, procedia-se à sua retirada, também com recurso à ponte rolante, devido à sua elevada massa global. A figura 105 ilustra o batente, a virola a ser cortada e o batente já instalado.



A figura 106 ilustra o modelo 3D do gabarito desenvolvido e o mesmo após a sua execução. Este gabarito, com a sua maior leveza e facilidade de manuseamento, permitiu reduzir os tempos de traçagem, conduzindo à necessidade de apenas um operador.

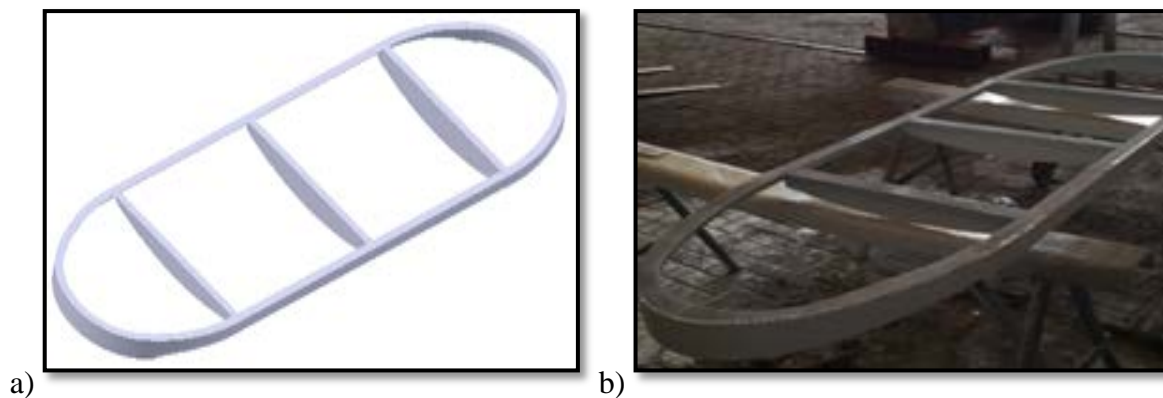


Figura 106 - a) Gabarito desenvolvido; b) Gabarito fabricado.

6.3. Estrutura de Apoio à Ligação do Batente

Uma outra melhoria implementada consistiu em melhorar um dispositivo de apoio à ligação soldada do batente no seu exterior. A estrutura do anterior dispositivo revelava ser bastante instável, em que além das questões de segurança dos operadores, não permitia a execução de uma ligação soldada perfeita pelo exterior do batente. Assim, foi desenvolvida uma estrutura (figura 107) com a estabilidade e rigidez necessárias para garantir tanto a segurança do operador como a qualidade do cordão de ligação. A figura 108 mostra o dispositivo após a sua fabricação.

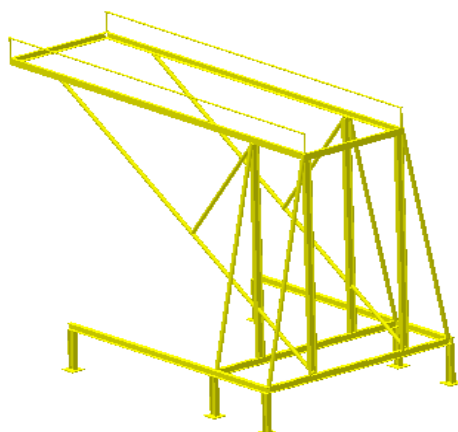


Figura 107 - Dispositivo para solda do batente.



Figura 108 - Dispositivo fabricado.

6.4. Virador para Montagem de Internos

Outro trabalho desenvolvido consistiu na melhoria de um dispositivo designado por virador para montagem de internos, que é utilizado na fase final do processo produtivo das torres aquando da montagem dos seus componentes internos, tais como as escadas, iluminação, plataformas de descanso, porta, entre outros. Existindo na empresa alguns viradores desse tipo (figura 109) houve a necessidade de proceder ao desenvolvimento de uns viradores novos para a nova unidade fabril com algumas características diferentes.

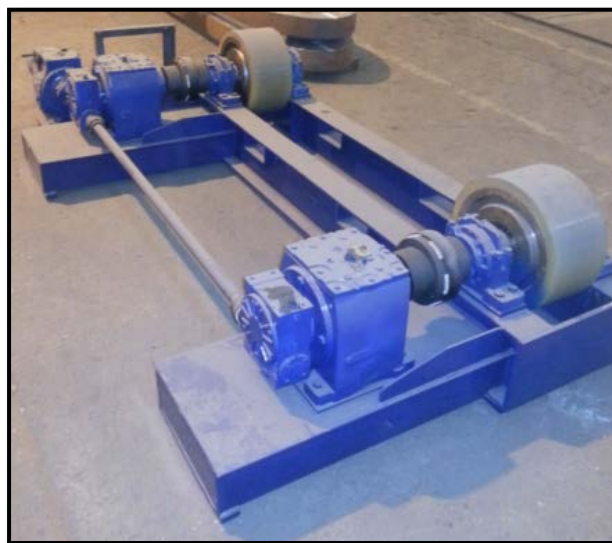


Figura 109 - Viradores existentes na empresa.

As melhorias implementadas situaram-se ao nível do sistema de rotação e da zona de contacto com o chão, que no caso dos viradores existentes apenas poderiam ser utilizados fora dos trilhos por não conterem rodas para se poderem movimentar ao longo do trilho.

A figura 110 mostra o modelo 3D dos novos viradores desenvolvidos. Atendendo às condições de projeto, desenvolveu-se e calculou-se uma estrutura de suporte nova, com as rodas embutidas na estrutura para que assim possam ser utilizadas tanto nos trilhos como chão, não danificando as rodas. Em relação ao sistema de rotação optou-se por retirar o recurso a um *cardan* e aplicar dois motores e dois redutores independentes. Estes viradores, no final de estágio aguardavam a fabricação.

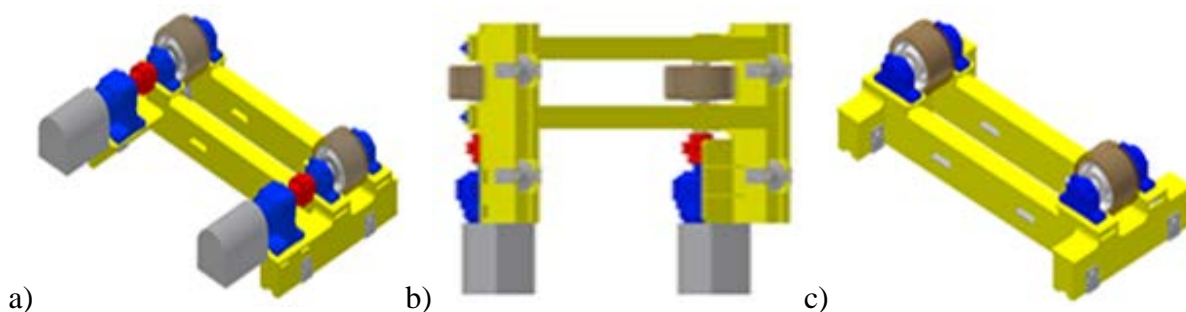


Figura 110 - a) Virador motriz; b) Detalhe da roda embutida na estrutura; c) Virador livre.

6.5. Carro de Transferência

Este trabalho, solicitado à Engebasa por uma Empresa externa consistiu na alteração de uma estrutura de um equipamento, designado por “carro de transferência”. Trata-se de um equipamento para utilização num porto marítimo, e que se destina a proceder à transferência de alumina em pó diretamente dos navios para os camiões de transporte. Este carro contém dois silos onde é depositada a alumina e faz a movimentação até aos camiões onde entrega o material através da abertura dos silos. O cliente forneceu o projeto inicial, e a pretensão de alterações na sua estrutura, tendo o desenvolvimento do trabalho sido entregue ao estagiário posteriormente ser apresentado ao cliente para sua aprovação. A figura 111 ilustra o modelo 3D do carro com a estrutura nova, estando no final do estágio a Engebasa a aguardar a aprovação do cliente.

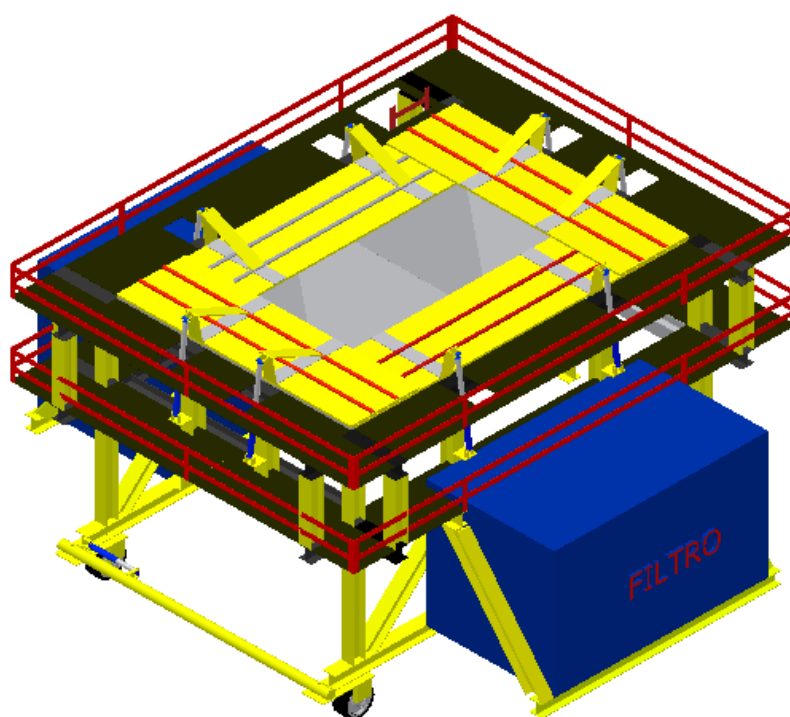


Figura 111 - Carro de transferência projetado.

7. CONCLUSÃO

A área de desenvolvimento de equipamentos e sistemas mecânicos, inserida no âmbito da Engenharia Mecânica é de elevada importância em qualquer unidade industrial. Trata-se de uma área bastante interessante e muito abrangente, onde se podem aplicar todos os conhecimentos e competências adquiridas ao longo do percurso académico. Além disso, é a área de maior interesse e motivação para o estagiário. Ora, afortunadamente foi nesta área que se enquadrou o estágio cujo relatório aqui se apresentou. Tratou-se de uma experiência imensamente gratificante e bastante enriquecedora, e que além de permitir o contacto com a realidade do meio industrial, possibilitou a aquisição e cimentação de um conjunto de competências de extrema importância tanto ao nível da aprendizagem profissional como em termos pessoais.

O estagiário sentiu-se integrado, desde o primeiro dia de trabalho, numa equipa altamente qualificada e sempre pronta para esclarecer dúvidas e responder a questões, o que em muito contribuiu para o sucesso global deste estágio. Todos os dias surgia um desafio novo para ultrapassar, em que a palavra de ordem era resolver. E sempre foi sentida total confiança da empresa no desempenho do estagiário. Esta firmeza e risco assumidos pelos responsáveis da Engebasa permitiu o desenvolvimento e introdução de soluções para a melhoria do processo produtivo das torres eólicas. Neste aspeto destacou-se o desenvolvimento de um sistema mecânico para movimentação automática dos troços das torres, tanto como desafio como relativamente à sua responsabilidade, tendo em conta todos os custos envolvidos e as dificuldades de aplicação do equipamento. Apesar do grau de exigência foi um projeto deveras gratificante tendo em conta o envolvimento do estagiário nele, com participação em todas as etapas do seu desenvolvimento, desde a fase conceptual até à sua implementação. E foi uma solução do total agrado dos responsáveis da empresa.

Tendo em conta todas as tarefas desenvolvidas e o sucesso dos processos de melhoria implementados pode-se afirmar que este estágio ultrapassou os objetivos inicialmente propostos, havendo ganhos tanto para o estagiário como para a Empresa. Pese embora as dificuldades dada a distância a Portugal, cumpre ao estagiário finalizar com a certeza de ter escolhido corretamente a Empresa onde realizar o seu estágio.

BIBLIOGRAFIA

- Almeida, P. (2008). *Produção de uma torre eólica com transformador interno e desenvolvimento do respetivo sistema de ventilação na Martifer Energy Systems*. Relatório do projeto final, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- American Society for testing and materials (1998). ASTM STP 993 Bulletin: *Mechanical Removal of Residual Tensions*. Cincinnati, Ohio, USA.
- Andreucci, R. (2006). *Ensaio por ultra-som*. Associação brasileira de ensaios não destrutivos, São Paulo.
- Andreucci, R. (2008). *Líquidos Penetrantes*. Associação brasileira de ensaios não destrutivos, São Paulo.
- Araújo, W. R. (2004). *Comparação entre soldagem robotizada com arame sólido e metal cored: a ocorrência do finger*. Dissertação de mestrado, UFMG.
- Dutra, R. M. (2001). *Viabilidade técnico-económica da energia eólica face ao novo regulamento do setor eléctrico brasileiro*. Dissertação de mestrado Sc., Programa de Panejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: Brasil.
- Dutra, R. M. (2008). *Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA*. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro.
- Dutra, R. M. (2009). *Energia eólica, princípios e tecnologia*. Centro de referências para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), Rio de Janeiro.
- Gasch, R., & Twele, J. (2002). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Berlin: Solarpraxis AG.
- Krautkramer (2010). *Ultrasonic Testing of Materials*. Alemanha.
- Martins, C., Morilla, J., Marques, P., & Delijaicov, S. (2012). *Alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes*. UNISANTA - Science and Technology, 1, 69 – 75, Santos.

Mendonça, C. (2004). *Alívio de tensões de soldas por tratamento térmico e vibração: uma comparação entre os dois métodos*. Rio de Janeiro.

MIG/MAG Welding, Svetsaren, vol. 58, nº 2, 2003.

Ortega, L. (2003). *Avaliação por ultra-som de tratamento térmico de alívio de tensões em componente industrial*. Rio de Janeiro: Brasil.

Pacheco, F. (2006). *Conjuntura e Planejamento*. SEI, 149, 4-11, Salvador: Brasil.

The Licoln Elétric (2010). *The Procedure Hand Book of Arc Welding*.

Torres, J. (2001). *Sebenta Elementos Orgânicos de Máquinas*, ISEC, Coimbra.